INVESTIGACION y CIENCIA

ORIGEN DE LOS DINOSAURIOS

ASTRONOMIA EN EL ULTRAVIOLETA EXTREMO

LA IMPORTANCIA DE SER IMPERFECTO

Edición española de SCIENTIFIC AMERICAN



LA VIDA COTIDIANA EN EL NEOLITICO

OCTUBRE 1994
700 PTAS.

Los espacios en gris
corresponden a publicidad
en la edición impresa



Octubre de 1994 Número 217



Edición española de **SCIENTIFIC AMERICAN**

SECCIONES

COLABORADORES DE ESTE NUMERO

Asesoramiento y traducción:

Laureano Carbonell: *Los submarinos del Tercer Mundo*; Mónica Murphy: *Astronomía en el ultravioleta extremo*; Luis Bou: *Microscopía confocal*, *La importancia de ser imperfecto* y *Juegos matemáticos*; Juan Pedro Campos: *Superconductores de interferencia cuántica*; Esteban Santiago: *Presentación celular de los antígenos*; Ana Mª Rubio: *La lección de los huesos de Abu Hureyra*; J. Vilardell: *Hace...* y *Taller y laboratorio*; Shigeko Suzuki: *De cerca*

Ciencia y sociedad:

Luis Bou

Ciencia y empresa:

M. Puigcerver

PROCEDENCIA DE LAS ILUSTRACIONES

Portada: Alfred T. Kamajian

Página	Fuente
7	Jane's Information Group
8	George Retseck
12-13	Center for EUV Astrophysics
14	Guilbert Gates/JSD
15	Center for EUV Astrophysics
16-18	Jared Schneidman/JSD (*dibujos*)
20-21	Jeff W. Lichtman
22	Matthew H. Chestnut
23	Stephen J. Smith y Michael E. Dailey (*arriba*), Jeff W. Lichtman (*abajo*)
24	Jared Schneidman/JSD (*dibujos*), Jeff W. Lichtman y Susan Culican (*fotografías*)
25	Jeff W. Lichtman
36	Ian Worpole
37	David Scharf
38-39	Ian Worpole
40	Ian Worpole (*arriba*), Non Fan y John Clarke (*abajo*)
41	Ian Worpole
42	R. C. Black y F. C. Wellstood, Universidad de Maryland
43	Christopher C. Gallen, Instituto Scripps, y Eugene C. Hirschkoff, Biomagnetic Technologies
45	Dennis Kunkel/Phototake, Inc.
46-47	Dimitry Schidlovsky
48-49	Guilbert Gates/JSD (*arriba*), Paul Travers, Birkbeck College (*centro*), Dimitri Schidlovsky (*abajo*)
50-51	Dimitri Schidlovsky
53-54	Fernando E. Novas
55	Silvia Nuere
56	F. Coffa (*arriba*) y Fernando E. Novas (*abajo*)
57	Silvia Nuere (*arriba y abajo izda.*) P. Sereno (*abajo derecha*)
58	S. Nuere (*arriba*), Fernando E. Novas (*centro*) y S. Nuere (*abajo*)
59	Silvia Nuere
60	Roberto Osti
62-64	Roberto Osti (*arriba*)
65	Roberto Osti
67	Documents Pour la Science
68	Spektrum der Wissenschaft
69-79	Documents Pour la Science
84-86	Andrew Christie
87-91	Documents Pour la Science



LA PORTADA evoca una tarea diaria que dejó notables marcas en los huesos de las mujeres del Neolítico. Consistía en la molienda de los cereales en un molinillo manual de piedra en forma de sillín. De rodillas durante horas, la mujer restregaría la muela hacia el extremo opuesto del molino y luego, con fuerza, hacia atrás, aplicando una tensión constante sobre huesos y articulaciones (*véase* "La lección de los huesos de Abu Hureyra", de Theya Molleson, en este mismo número).

INVESTIGACION Y CIENCIA

DIRECTOR GENERAL Francisco Gracia Guillén
EDICIONES José María Valderas, *director*
ADMINISTRACIÓN Pilar Bronchal, *directora*
PRODUCCIÓN M.ª Cruz Iglesias Capón
Bernat Peso Infante
SECRETARÍA Purificación Mayoral Martínez
EDITA Prensa Científica, S. A. Muntaner, 339 pral. 1.ª – 08021 Barcelona (ESPAÑA)
Teléfono (93) 414 33 44 Telefax (93) 414 54 13

SCIENTIFIC AMERICAN

EDITOR Jonathan Piel
BOARD OF EDITORS Michelle Press, *Managing Editor*; John Rennie, *Associate Editors*; Timothy M. Beardsley; W. Wayt Gibbs; Marguerite Holloway; John Horgan, *Senior Writer*; Kristin Leutwyler; Philip Morrison, *Book Editor*; Madhusree Mukerjee; Corey S. Powell; Ricki L. Rusting; Gary Stix; Paul Wallich; Philip M. Yam.
CHAIRMAN AND CHIEF EXECUTIVE OFFICER John J. Hanley
CO-CHAIRMAN Dr. Pierre Gerckens
CHAIRMAN EMERITUS Gerard Piel

SUSCRIPCIONES

Prensa Científica S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona (España)
Teléfono (93) 414 33 44
Fax (93) 414 54 13

Precios de suscripción, en pesetas:

	Un año	Dos años
España	7.700	14.000
Extranjero	8.600	15.800

Ejemplares sueltos:

Ordinario: 700 pesetas
Extraordinario: 900 pesetas

—Todos los precios indicados incluyen el IVA, cuando es aplicable.

— En Canarias, Ceuta y Melilla los precios incluyen el transporte aéreo.

— El precio de los ejemplares atrasados es el mismo que el de los actuales.

DISTRIBUCION

para España:

MIDESA

Carretera de Irún, km. 13,350
(Variante de Fuencarral)
28049 Madrid Tel. (91) 662 10 00

para los restantes países:

Prensa Científica, S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª – 08021 Barcelona
Teléfono (93) 414 33 44

PUBLICIDAD

GM Publicidad
Francisca Martínez Soriano
Menorca, 8, bajo, centro, izquierda.
28009 Madrid
Tel. (91) 409 70 45 – Fax (91) 409 70 46

Cataluña y Baleares:
Miguel Munill
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona
Tel. (93) 321 21 14
Fax (93) 414 54 13



ISSN 0210136X Dep. legal: B. 38.999 - 76

Fotocomposición: Tecfa. Línea Fotocomposición, S.A. Almogàvers, 189 - 08018 Barcelona
Fotocromos reproducidos por Scan V2, S.A., Avda. Carrilet, 237 - 08907 l'Hospitalet (Barcelona)
Imprime Rotographik, S.A. Ctra. de Caldes, km 3,7 - Santa Perpètua de Mogoda (Barcelona)

Printed in Spain - Impreso en España

Hace...

...cincuenta años

Scientific American: «La producción de penicilina se ha incrementado hasta tal extremo, que la del mes de marzo de 1944 centuplica la de los cinco primeros meses de 1943. Para uso civil se ha comprometido una cantidad del fármaco suficiente para atender todos los casos urgentes en un futuro más o menos inmediato.»

«Actualmente se dispone de maniquíes de plástico transparente modelados según las medidas de las ciudadanas WASP (blancas, anglosajonas y protestantes); con ellos, los proyectistas ajustan interiores y equipos de los aviones para que las aviadoras puedan actuar sin peligro y a pleno rendimiento en los puestos de combate diseñados de acuerdo con las medidas corporales de los aviadores del Ejército de los Estados Unidos. La acción de cada articulación se reproduce mediante 'tendones' elásticos que posibilitan conocer las necesidades de espacio para actuar 'en condiciones reales'. Para después de la guerra se prevén aplicaciones de la idea al diseño de automóviles, muebles y equipos personales.»

«Un breve estudio sobre las patentes, recientemente publicado, pone de manifiesto el número elevado de inventos en la industria papelera merced a los cuales puede tratarse la pulpa de calidad inferior para conseguir tipos de papel continuo impermeable, flexible, fusible y resistente a grasas y aceites.»

«Contamos ya con un dispositivo que utiliza carbón vegetal como combustible de vehículos a motor. Esencialmente el 'gasógeno' consiste en un generador con una capacidad de almacenamiento de unos cuarenta y cinco kilos de carbón. Ese generador está conectado, a través de filtros de purificación y reducción de temperatura, a un carburador centrífugo donde se mezcla el gas con aire y se envía al colector de admisión. Según los ensayos, un camión de dos toneladas equipado con gasógeno y funcionando por carreteras bastante accidentadas alcanza una velocidad media de casi cincuenta kilómetros por hora consumiendo unos cuarenta kilos de carbón por cada cien kilómetros.»

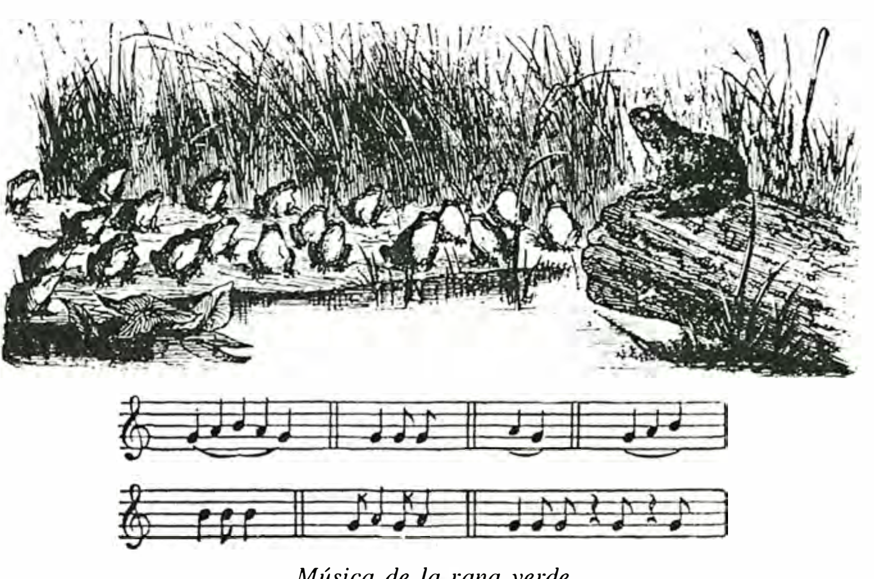
...cien años

Scientific American: «Mr. Garrett P. Serviss, el famoso astrónomo, afirmó recientemente que la cuestión principal sobre Marte es si se halla habitado o si ha perdido su capacidad para albergar vida animal. Recordó asimismo que el profesor Campbell, del Observatorio Lick, ha demostrado, mediante observación espectroscópica, que el planeta no muestra más señales de atmósfera que las que puede ofrecer la Luna. Ahora bien, la existencia de nieves polares y humedad parecían indicar la presencia de una atmósfera que, aunque poco densa tal vez, podría bastar para soportar alguna forma de vida animal adaptada a la misma.»

«En los últimos doce años la manufactura del vidrio ha progresado con tal rapidez, que cabe preguntarse ahora si existe algo que no se haga con él. De vidrio son tuberías de gran diámetro, azulejos, desagües, tinas, cortinas, muebles, chimeneas y hasta edificios. El vidrio se sopla ya mecánicamente y, como esas máquinas tienen el aliento de un gigante, manufacturar objetos de gran tamaño se ha convertido en algo muy sencillo.»

«Anotar o reproducir el sonido de las ranas no es cosa fácil. Sin embargo, la música de Hermann Landois, ejecutada por una voz joven y discordante, es capaz de recordarnos muy de cerca el croar de la rana verde. Transcribir el croar de la rana verde (*véase ilustración*) es difícil; fácil, en cambio, registrar las espasmódicas notas de las ranas moteadas o de las ranas de zarzal. La rana moteada, generalmente considerada muda, lanza un 'canto' simple en la época de desove; se limita a repetir una sola nota. En lo que respecta a las ranas de zarzal, su voz es sonora, clara, y podría compararse al sonido de una campanilla de plata. En líneas generales, los sonidos de las ranas podrían expresarse así: ¡Brekeke-brekeke, krèkete! ¡Ekpate tu-u-o! ¡Brekete- brekete! ¡Brekete, cuar, brekete, tu-u!'—*La Science en Famille*.»

«A Jefferson le agradaba mucho narrar una historia que ilustra la importancia que a veces pueden asumir asuntos ridículamente insignificantes. Cuando se congregó la asamblea deliberante que hizo pública la Declaración de Independencia, desarrolló aquélla sus debates en una sala cercana a una cuadra de caballos de alquiler. Hacía un calor sofocante y del establo llegaban enjambres de moscas que picaban a los honorables a través de sus finas medias de seda. Desesperado, alguno sugirió acelerar las cosas para levantar la asamblea y librarse de las moscas. La inmortal declaración fue copiada a toda prisa y los honorables representantes se precipitaron a la mesa para firmar la copia auténtica. De no haber sido por la cuadra y sus inquilinos, es imposible saber cuándo se habría terminado el documento, pero desde luego no se habría firmado el Cuatro de Julio.—*New York Sun*.»



Música de la rana verde

Los submarinos del Tercer Mundo

La proliferación de submarinos puede convertirse en una amenaza para las fuerzas navales establecidas y poner en peligro los equilibrios regionales

Daniel J. Revelle y Lora Lumpe

En la primavera de 1993, Irán inició, en el golfo Pérsico, las pruebas de mar del primero de los submarinos de la clase Kilo que había comprado a Rusia. Su posesión le permite cerrar el estrecho de Ormuz, angosto canal por donde circula la cuarta parte del petróleo mundial.

Mientras duró la guerra fría, la misión principal de la Armada estadounidense era la del seguimiento de los submarinos nucleares soviéticos. Superado ese riesgo, han surgido prioridades contradictorias. Por un lado, las crecientes fuerzas navales del Tercer Mundo emergen como una amenaza contra la capacidad de la Marina norteamericana de operar en aguas costeras del globo entero. Por otro lado, el sector industrial que suministraba el material militar necesario durante la guerra fría presiona para que EE.UU. se una a aliados y enemigos de antaño en el suministro de submarinos de propulsión diésel, de tipo muy avanzado, a los países en vías de desarrollo.

Una veintena larga de países del Tercer Mundo poseen ya más de 150 submarinos diésel de ataque: 25 Corea del Norte, 18 India, 15 Turquía, 10 Grecia, 8 Egipto y 6 Libia y Pakistán. Muchas de estas unidades son viejas, se hallan en mal estado o las opera una tripulación inexperta. Otras, en cambio, podrían competir en pie de igualdad con las armadas del mundo industrial.

DANIEL J. REVELLE y LORA LUMPE colaboraron en el Proyecto de Seguimiento de la Venta de Armas de la Federación de Científicos Americanos (FAS), de Washington. Revelle, físico de formación, se dedica ahora a la ingeniería aeroespacial. Lumpe continúa al frente del citado programa.

Las naciones del Tercer Mundo han adquirido sus unidades más avanzadas en Rusia y países del occidente europeo, cuya capacidad de construcción de submarinos excede su demanda interna. Hans Saeger, de la empresa naval alemana HDW, estima que los países miembros de la OTAN tienen capacidad para construir 19 unidades al año, aunque suelen adquirir sólo dos o tres. No debe, pues, sorprendernos el fuerte impulso por no querer desperdiciar la capacidad restante.

Alemania, uno de los principales exportadores, no sólo vende las unidades acabadas, sino también las técnicas y el equipo de producción para construirlas. Convenios de "coproducción" de este tipo, además de incentivar las ventas, elevan el número de naciones que compiten por el mercado, haciendo más difícil limitar su proliferación. Alemania ha firmado convenios de coproducción con Corea del Sur, India y Argentina, autorizando a esta última la fabricación de otros dos submarinos para la reexportación.

Rusia halla en la venta de armamento una fuente de las divisas que con tanta urgencia necesita. La Marina rusa manifestó hace algunos años el propósito de continuar construyendo dos submarinos diésel al año, uno para ella y otro para venderlo al contado. Entre sus clientes figuraron Libia, Corea del Norte, India y Argelia. Más recientemente, Irán adquirió dos unidades de la clase Kilo, con opción sobre una tercera.

En el negocio participan otras naciones. Francia ha proporcionado sus modelos Daphné y Agosta (éste más moderno) a Pakistán. China ha vendido submarinos de la clase Romeo, algo anticuados, a Corea del Norte y Egipto. Suecia exporta a Malasia e intenta introducirse en el sudeste asiático. Holanda está considerando la venta de 10 submarinos a Formosa, en lo que se espera que sea la última gran venta del siglo. El Reino Unido, mientras tanto, liquida cuatro unidades diésel nuevas de la clase Upholder que su armada ya no tiene dinero para mantener, ofreciéndolas incluso en alquiler completas y tripuladas por mercenarios.

Desde los años sesenta, la Marina estadounidense ha adquirido sólo submarinos de propulsión nuclear. Pero cuenta con la aprobación oficial para construir modelos diésel. En un informe presentado al Congreso en 1992, la Marina sostenía: "La construcción de submarinos diésel destinados a su exportación en los astilleros norteamericanos no bastaría para sostener la infraestructura pertinente, con el agravante de que podría fomentar la fabricación de unidades diesel en detrimento de nuestras propias fuerzas". Sin embargo, en abril de 1994 el Departamento de Estado autorizó la producción en el astillero Ingalls, en Pascagoula, del Tipo 209 bajo licencia de la empresa alemana HDW. Egipto se propone comprar dos unidades de ésas, pero no está en condiciones de adquirirlas directamente de Alemania. Las unidades construidas por Ingalls se comprarían recurriendo a la ayuda militar norteamericana, que puede gastarse sólo en armamento de fabricación estadounidense.

Una vez puesta en marcha esta nueva línea de producción, los intereses económicos habrán de presionar para abrir nuevos mercados en los países en vías de desarrollo. Formosa y Arabia Saudita aparecen entre los futuros clientes de las unidades del Tipo 209 construidas en EE.UU.

A medida que los recortes presupuestarios militares se van sumando a las incertidumbres económicas, los



1. SUBMARINO DE LA CLASE UPHOLDER, uno de los cuatro que la Marina Real Británica construyó en los años ochenta y que ahora, por recortes presupuestarios en materia de defensa, no puede mantener en servicio. El Reino Unido está dispuesto a vender estos submarinos diésel o a arrendarlos completos, con tripulación mercenaria incluida.

fabricantes se sienten forzados a buscar nuevos compradores. Y han fijado su punto de mira en las naciones del golfo de Omán, el Mediterráneo, el mar Arábigo y el norte del océano Indico, el mar de China Meridional y de la costa norasiática del Pacífico. El éxito de la operación puede poner en serio peligro la estabilidad internacional.

Hubiera bastado una flotilla de modernos submarinos diésel, en buen estado, para dar un cariz muy diferente a la guerra del golfo Pérsico. Si Saddam Hussein hubiera adquirido seis unidades modernas "y situado tres a cada lado del estrecho de Ormuz, se habrían complicado las cosas", reconoce el vicealmirante James Williams. "La presencia de un submarino diésel condiciona el desenvolvimiento de las demás naves", asegura.

Durante la guerra de las Malvinas, un submarino argentino del Tipo 209 logró eludir a 15 fragatas y destructores británicos, además de los aviones antisubmarinos de dos portaaviones. El *San Luis* maniobró hasta tener a la flota británica al alcance de sus torpedos y disparó tres, aunque los tres fallaron. En el inicio de las hostilidades, un submarino británico hundió el crucero argentino *General Belgrano* con dos torpedos de trayectoria rectilínea, cuyo diseño data de la Segunda Guerra Mundial.

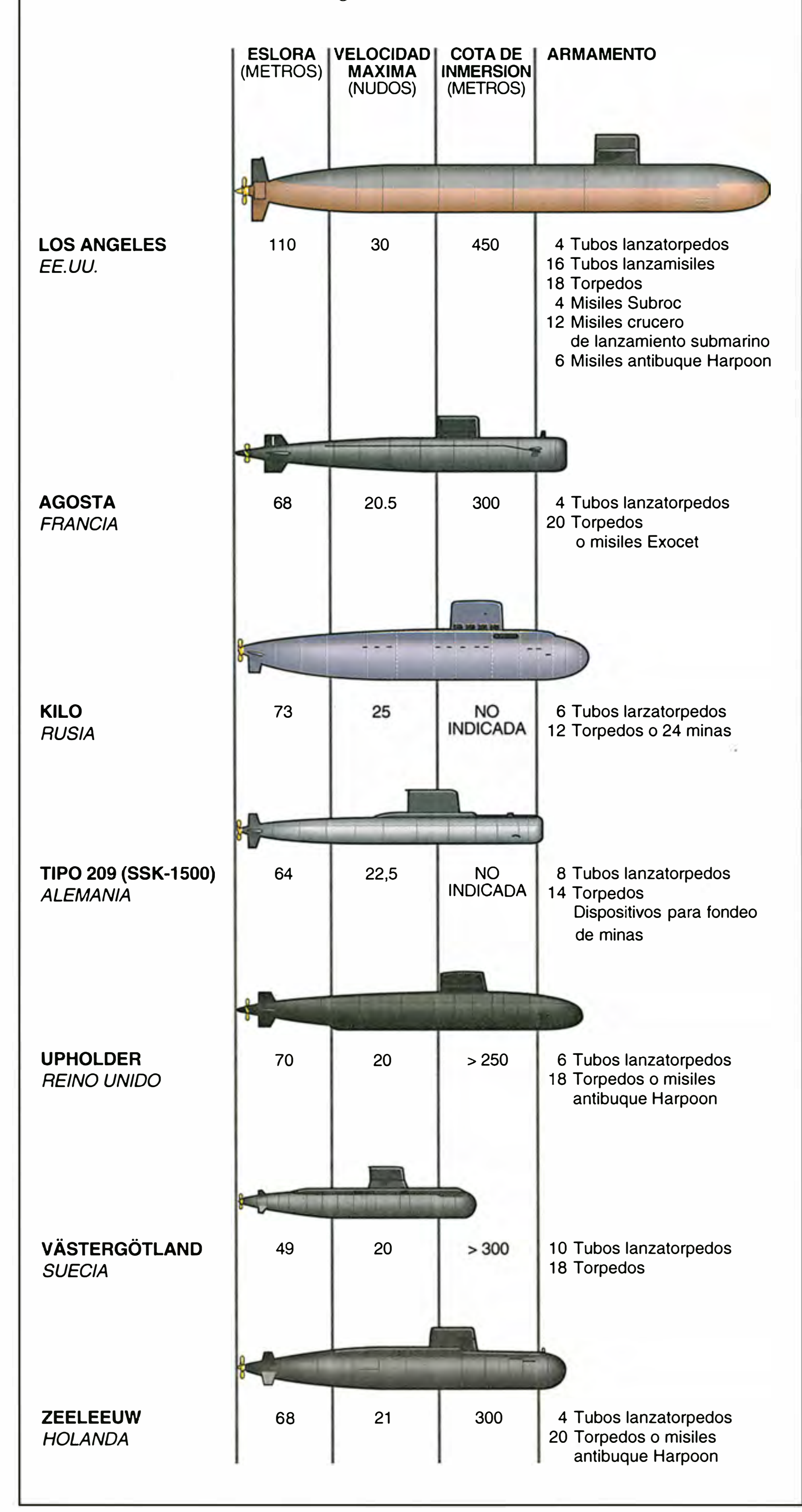
Las marinas de EE.UU. y del Reino Unido están desarrollando armas antitorpedos que entrarán en operación a finales de siglo. Por ahora, los únicos medios capaces de evitar que un torpedo alcance el objetivo son las maniobras de evasión y las contramedidas electrónicas. Gracias a las naciones industrializadas, casi todas las fuerzas navales del Tercer Mundo cuentan con torpedos muy avanzados, capaces de hacer blanco y explotar justo debajo de la quilla de un buque, donde producen el máximo daño.

Algunos países poseen misiles antibuques de lanzamiento submarino. Estados Unidos ha vendido el Harpoon a Israel, Pakistán y otras naciones; los franceses están comercializando una versión submarina del Exocet.

La potencia letal de las armas empleadas por los submarinos hace de la detección precoz, y la destrucción, un factor decisivo en la guerra antisubmarina (en adelante, GAS). Como

Submarinos de ataque en venta

Los submarinos propulsados por motor diésel que se venden a las naciones en vías de desarrollo son menores y más lentos que los de propulsión nuclear, como el de la clase Los Angeles. No obstante, plantean una grave amenaza para la navegación y las fuerzas que hubieran de intervenir en conflictos regionales.



	ESLORA (METROS)	VELOCIDAD MAXIMA (NUDOS)	COTA DE INMERSION (METROS)	ARMAMENTO
LOS ANGELES *EE.UU.*	110	30	450	4 Tubos lanzatorpedos 16 Tubos lanzamisiles 18 Torpedos 4 Misiles Subroc 12 Misiles crucero de lanzamiento submarino 6 Misiles antibuque Harpoon
AGOSTA *FRANCIA*	68	20.5	300	4 Tubos lanzatorpedos 20 Torpedos o misiles Exocet
KILO *RUSIA*	73	25	NO INDICADA	6 Tubos larzatorpedos 12 Torpedos o 24 minas
TIPO 209 (SSK-1500) *ALEMANIA*	64	22,5	NO INDICADA	8 Tubos lanzatorpedos 14 Torpedos Dispositivos para fondeo de minas
UPHOLDER *REINO UNIDO*	70	20	> 250	6 Tubos lanzatorpedos 18 Torpedos o misiles antibuque Harpoon
VÄSTERGÖTLAND *SUECIA*	49	20	> 300	10 Tubos lanzatorpedos 18 Torpedos
ZEELEEUW *HOLANDA*	68	21	300	4 Tubos lanzatorpedos 20 Torpedos o misiles antibuque Harpoon

es obvio, cuesta más detectar un submarino que un buque o un avión. Los submarinos diésel navegan muy silenciosos. Sólo con las baterías, pueden moverse a poca velocidad durante varios días, lo que elimina el ruido del motor y la necesidad de salir a superficie o de utilizar el esnorkel para renovar el aire.

Los submarinos diésel tienen una autonomía limitada, por lo que prefieren las aguas litorales a las profundidades oceánicas. La mayoría de los países en vías de desarrollo, que los poseen en número reducido, los mantienen desplegados por la costa en misiones defensivas. Pero la operación de detectar estas unidades puede ser muy compleja y su destrucción arriesgada.

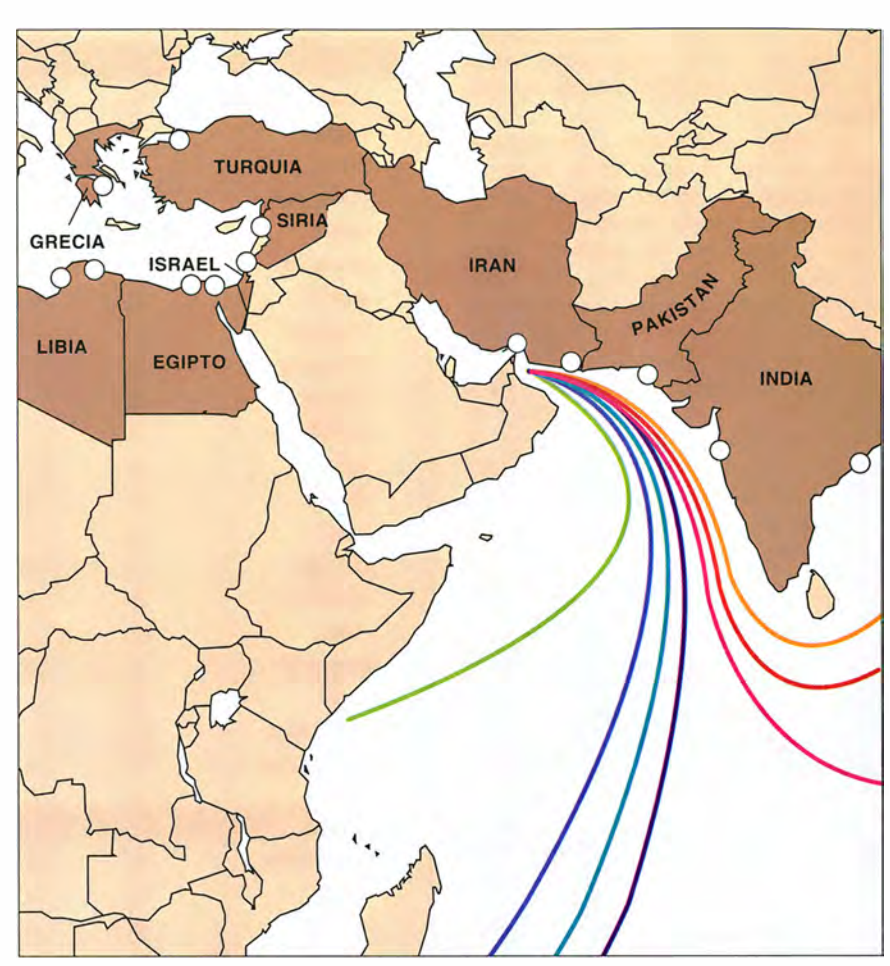
Las aguas "someras" donde operan los submarinos diésel pueden alcanzar profundidades de hasta 300 metros, lo que les proporciona mucho espacio donde ocultarse. Al mismo tiempo, la proximidad del fondo permite la emisión de ecos de sonar falsos, que enmascaran la posición de la unidad. Barcos, torres de perforación y la vida marina añaden ruido en las áreas costeras, complicando aún más el trabajo del operador encargado de detectar los submarinos (en adelante, operador GAS). Los detectores de anomalías magnéticas, utilizados para descubrirlos en mar abierto, pueden verse confundidos por la conjunción de un fondo somero y "la basura magnética" esparcida por la plataforma continental.

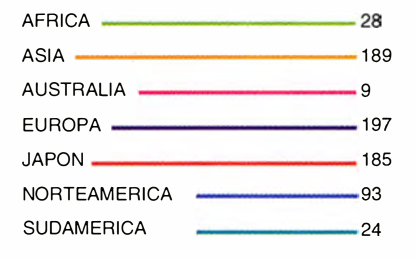
Para detectar submarinos y determinar su situación, los operadores GAS deben catalogar otras fuentes sonoras de la región por donde aquéllos podrían viajar y cartografiar los perfiles térmicos, de profundidad y de salinidad, así como las condiciones del fondo marino que pueden afectar a la trayectoria de las emisiones acústicas y los ecos del sonar. La Marina de EE.UU. empezó a abordar el problema en aguas del golfo Pérsico, en las que no hubo submarinos hasta 1992. Ese año Irán adquirió su primer buque Kilo y Norteamerica destinó dos unidades nucleares de ataque de la clase Los Angeles a patrullar y realizar levantamientos hidrográficos en la zona.

En condiciones normales, los submarinos diésel ofrecen muchas ventajas, pero no están exentos de inconvenientes. Sus motores hacen más ruido que los reactores nucleares y no imprimen la misma velocidad al submarino. Cuando navegan a toda potencia utilizando energía eléctrica, sus baterías se agotan en pocas ho-

ras. Incluso navegando a velocidades menores han de aproximarse a la superficie para renovar el aire cada 4 a 10 días, dependiendo de las características del submarino y de la disposición del comandante a correr el riesgo de quedarse sin energía para no ser detectado. Las fuerzas de la GAS podrán imponerse protegiendo el área con unidades aéreas y navales. En palabras del almirante Henry Mauz, comandante en jefe del Atlántico norteamericano, "si se le impide el uso del esnorkel, se le mantiene fuera de juego. Muy pronto deja de funcionar: demasiado calor, demasiado vapor y excesiva cantidad de dióxido y de monóxido de carbono."

Los diseños de nuevo cuño se proponen reducir estos problemas. Los Kilo y los Tipo 209, por ejemplo, emiten menos ruido que sus predecesores cuando renuevan el aire. Además, los astilleros suecos, alemanes, italianos, rusos y norcoreanos están desarrollando sistemas de propulsión independiente del aire (PIA), que eliminan la necesidad de usar periódicamente el esnorkel y permiten la permanencia de hasta un mes en inmersión. Suecia ha probado e incorporado a su diseño de nueva generación un sistema de PIA fundado en el empleo de un motor Stirling, esto es, un motor de combustión externa en el que la ignición del combustible no se produce por explosión; gracias a ello, resulta mucho más silencioso que cualquier motor diésel o gasolina. En otros proyectos se utilizan oxígeno líquido y sistemas de combustión muy eficientes o células de combustiión química cuya densidad de energía neta quintuplica la de los acumuladores de plomo.





2. GOLFO PERSICO, lugar de operación de submarinos desde 1992, cuando Irán recibió su primera unidad de Rusia y construyó una base en Bandar Abbas. Estados Unidos destinó entonces dos submarinos nucleares de ataque de la clase Los Angeles para que que patrullaran la zona y realizaran levantamientos cartográficos. Aproximadamente la cuarta parte del petróleo mundial pasa por ese singular punto de fricción.

Casi ninguna de las flotas submarinas desplegadas por el Tercer Mundo constituye hoy una amenaza insuperable para las operaciones navales. Reponsables de la Marina estadounidense señalan que "sólo una proporción relativamente pequeña de los océanos tiene menos de 300 metros de profundidad y casi toda se halla a menos de 55 kilómetros de la costa. El control de las zonas más profundas", afirman, "garantiza la seguridad operativa del grupo de combate y confina las posibles amenazas en áreas restringidas de aguas someras, donde son más sensibles a las minas submarinas y otros medios, asegurando entretanto que las rutas marítimas de comunicación permanezcan abiertas".

Según el servicio de inteligencia de EE.UU., las nuevas unidades Kilo, con base en el sur de Irán, son tan fáciles de detectar y destruir por la aviación norteamericana que su eliminación sería poco más que un "simple ejercicio de tiro". Los submarinos menos capaces no plantean necesariamente un serio peligro, aun cuando abunden. La flota norcoreana, por ejemplo, está formada por submarinos anticuados de la clase Romeo construidos en China, un tipo que la Unión Soviética dejó de vender en 1960. Las tripulaciones de submarinos libias tienen fama de estar poco entrenadas y las unidades están tan mal conservadas que, de las seis que el país posee, sólo una o dos pueden ser operativas: ninguna ha hecho una salida a la mar desde 1985.

Ante una situación tan variopinta, la Marina de EE.UU. ha adoptado dos medidas antagónicas. En su declaración programática "asegura el mantenimiento del contigente GAS necesario para garantizar la superioridad en todo el litoral", reconociendo así de un modo implícito que sus actuales fuerzas de GAS son adecuadas para hacer frente a las amenazas presentes y a las venideras a corto plazo. Al mismo tiempo, los militares justifican la puesta en marcha de un nuevo programa de submarinos nucleares de ataque y de varios nuevos proyectos de helicópteros, torpedos, sonar, radar y naves defensivas por el peligro que pudiera significar la presencia de submarinos diésel en aguas someras.

En efecto, la amenaza que la flota submarina de los países en vías de desarrollo representa para las fuerzas norteamericanas aumentará si las naciones siguen exportando submarinos

diésel y armamento más avanzados y sigilosos. Pero, ¿hay algún modo de frenar la multiplicación de las unidades?

Es difícil convencer a los exportadores de que el cese de la venta de submarinos al Tercer Mundo redundaría en su propio beneficio. Pero la idea de prescindir de posibles ventas no carece de precedentes. En 1987, cuando cundió la alarma en Occidente ante la proliferación de misiles balísticos, se logró dejar a un lado los intereses económicos y limitar la venta de misiles y la técnica de apoyo. El Ente de Control de la Técnica de Misiles (RCTM) prohíbe la transferencia de misiles, equipo o conocimientos que pudieran llevar a su proliferación.

IMPORTADORES	FLOTA	PEDIDOS
ARABIA SAUDITA	–	?
ARGELIA	2	–
CHILE	4	–
COLOMBIA	2	–
CUBA	3	–
ECUADOR	2	–
EGIPTO	8	2-6
FILIPINAS	–	?
FORMOSA	4	4
GRECIA	10	–
INDONESIA	2	–
IRAN	2	–
ISRAEL	3	2
LIBIA	6	–
MALASIA	–	?
PAKISTAN	6	3
PERU	9	–
SINGAPUR	–	?
SIRIA	3	–
SUDAFRICA	3	–
VENEZUELA	2	–

COPRODUCTORES	FLOTA	PEDIDOS
ARGENTINA	4	4
BRASIL	4	3
CHINA	45	–
COREA DEL NORTE	25	–
COREA DEL SUR	4	8
INDIA	18	6
TURQUIA	15	7

EXPORTADORES
ALEMANIA
CHINA
FRANCIA
HOLANDA
REINO UNIDO
RUSIA
SUECIA

FUENTE: *International Institute for Strategic Studies*

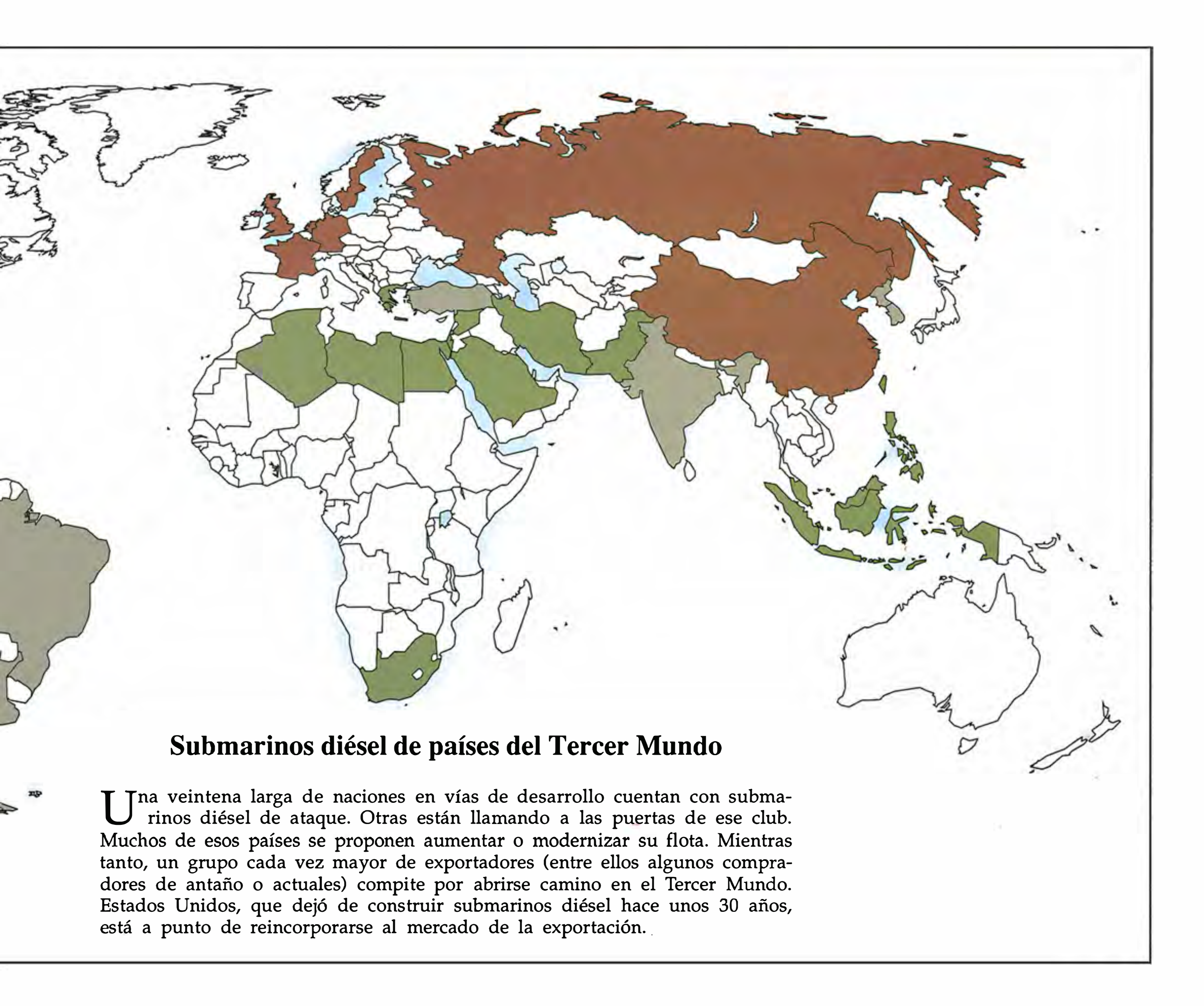
Los misiles recibieron especial atención porque podían atravesar las defensas enemigas y eran muy indicados para atacar por sorpresa, dos características desestabilizadoras compartidas por los submarinos. En manos de gobiernos insensatos, los submarinos de ataque despiertan el fantasma de acciones terroristas contra la marina mercante, sin olvidar su capacidad de hacer estragos en las fuerzas que operan en aguas costeras. Igual que se hizo con el RCTM, la mejor manera de detener la expansión de submarinos entre regímenes potencialmente hostiles es el control de su exportación. Las ventas rutinarias de misiles balísticos han dejado de ser una actividad comercial legal. Lo mismo puede conseguirse con los submarinos.

Quizás el mercado no sea tan extenso como para que los países desarrollados no renuncien. Los submarinos modernos son muy caros para la mayoría de los países; Pakistán, por ejemplo, tendría que pagar 233 millones de dólares por cada uno de los tres Agosta 90 que pretende adquirir en Francia. Pero China compite con Francia para conseguir la venta paquistaní. Ambos países ofrecen unas condiciones de financiación muy generosas que reducen considerablemente la rentabilidad de la transacción. Son pocos los clientes que pagan al contado. En el convenio entre EE.UU. y Egipto los ingresos que los astilleros Ingalls recibirían serían dólares del contribuyente norteamericano, que deberían gastarse en bienes y servicios estadounidenses.

Muchas de las ventas de submarinos se acompañan de acuerdos de cesión de la patente de los diseños y de la tecnología necesaria para su construcción. Así, el comprador puede independizarse e incluso competir con el vendedor original por futuros pedidos. Brasil, Argentina, Corea del Sur e India, antiguos compradores de submarinos, han construido algunas de sus propias unidades. Fue precisamente esta expansión de la capacidad de construcción lo que estimuló la creación del RCTM. Es posible que los países desarrollados se decidan a actuar de un modo parecido antes de perder el control del comercio mundial de submarinos, junto con el mercado mismo.

La exportación de submarinos se justifica a veces por la necesidad de mantener activo el sector industrial militar, pero tal vez las instalaciones que se pretende conservar no sean en absoluto útiles para la defensa de una nación moderna. Alemania ha estado vendiendo submarinos del Tipo 209 durante casi 20 años, pero no hay un solo 209 en su Armada. Para mantener su sector industrial de submarinos, les resultan más rentables, a Alemania y Suecia, los actuales pedidos domésticos de unidades dotadas con sistemas de propulsión independiente del aire, que proporcionarán trabajo hasta doblar el siglo. Para EE.UU., la producción de submarinos diésel en Mississipi no contribuiría a mantener la producción de submarinos nucleares en Virginia y Connecticut, aunque ayudaría a mantener a flote Ingalls, creando sin embargo una línea de producción cuyos resultados la Marina norteamericana no tiene interés en comprar ni en ver proliferar por todo el mundo.

Un buen paso hacia el control final de la exportación de submarinos podría ser la restricción de la venta de armas avanzadas, como los torpedos modernos y los misiles crucero antibuques. Estas armas, una de las cuales basta para hundir un buque de superficie grande, infligen gravísimos daños. Además, EE.UU. podría dar ejemplo interrumpiendo la exportación de los misiles Harpoon. Estas



Submarinos diésel de países del Tercer Mundo

Una veintena larga de naciones en vías de desarrollo cuentan con submarinos diésel de ataque. Otras están llamando a las puertas de ese club. Muchos de esos países se proponen aumentar o modernizar su flota. Mientras tanto, un grupo cada vez mayor de exportadores (entre ellos algunos compradores de antaño o actuales) compite por abrirse camino en el Tercer Mundo. Estados Unidos, que dejó de construir submarinos diésel hace unos 30 años, está a punto de reincorporarse al mercado de la exportación.

armas permiten que un submarino ataque, por ejemplo, a un portaaviones a 90 millas de distancia, fuera del alcance de los medios defensivos de éste.

A los gobiernos les resulta quizá más fácil oponerse a las ventas de torpedos y misiles, valoradas en cientos de miles de dólares, que a las de submarinos, que suponen cientos de millones. El torpedo más simple puede hundir un buque, pero las armas más modernas, que son más rápidas, difíciles de detectar, de mayor alcance, mejor dirigidas y capaces de burlar las contramedidas, tardarían muy poco en poner a las fuerzas navales en jaque. Si se limitara la exportación de armas submarinas a los tipos más sencillos, la amenaza se relajaría. El establecimiento de un acuerdo sobre la restricción de la coproducción o la venta de tecnología submarina sería otro paso lógico encaminado a cortar las exportaciones.

Entra dentro de los presumible la queja de los países compradores ante las restricciones. Una prohibición total de las ventas afectaría a amigos y enemigos por igual. Pero un acuerdo internacional efectivo abortaría una carrera armamentística en la mar antes de empezar.

Dada la larga vida de los submarinos y armas modernas, su exportación, incluso a países hoy aliados sólidos, se convierte en un negocio arriesgado. Para cuando prendió su revolución fundamentalista, Irán tenía en firme un pedido de seis submarinos alemanes del tipo 209. De haber contado con ellos, los habría utilizado con gran efecto contra las remesas de petróleo kuwaití e iraquí durante la guerra Irán-Irak y los podría haber vuelto contra la flota de EE.UU. cuando intervino para proteger la navegación de los petroleros.

Aunque en la actualidad los submarinos del Tercer Mundo no representan una amenaza abrumadora, la venta continuada de municiones y de unidades avanzadas ha desembocado en riesgos reales de proliferación. Los países productores de submarinos deben mirar más allá de los intereses comerciales inmediatos y fijarse en los imperativos de la seguridad a largo plazo, procurando encontrar un medio que reduzca o impida la venta de submarinos avanzados.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

ATTACK SUBMARINES IN THE POST-COLD WAR ERA: THE ISSUES FACING POLICY-MAKERS. Center for Strategic and International Studies, junio 1993.

NAVY SEAWOLF AND CENTURION ATTACK SUBMARINE PROGRAMS: ISSUES FOR CONGRESS. Ronald O'Rourke. Congressional Research Service Issue Brief, 7 de abril de 1994.

THE SUBMARINE REVIEW. Publicación trimestral de la Naval Submarine League, Annandale, Virginia.

Astronomía en el ultravioleta extremo

Las observaciones efectuadas en estas longitudes de onda, que antaño se consideraban imposibles, amplían nuestro conocimiento del cosmos

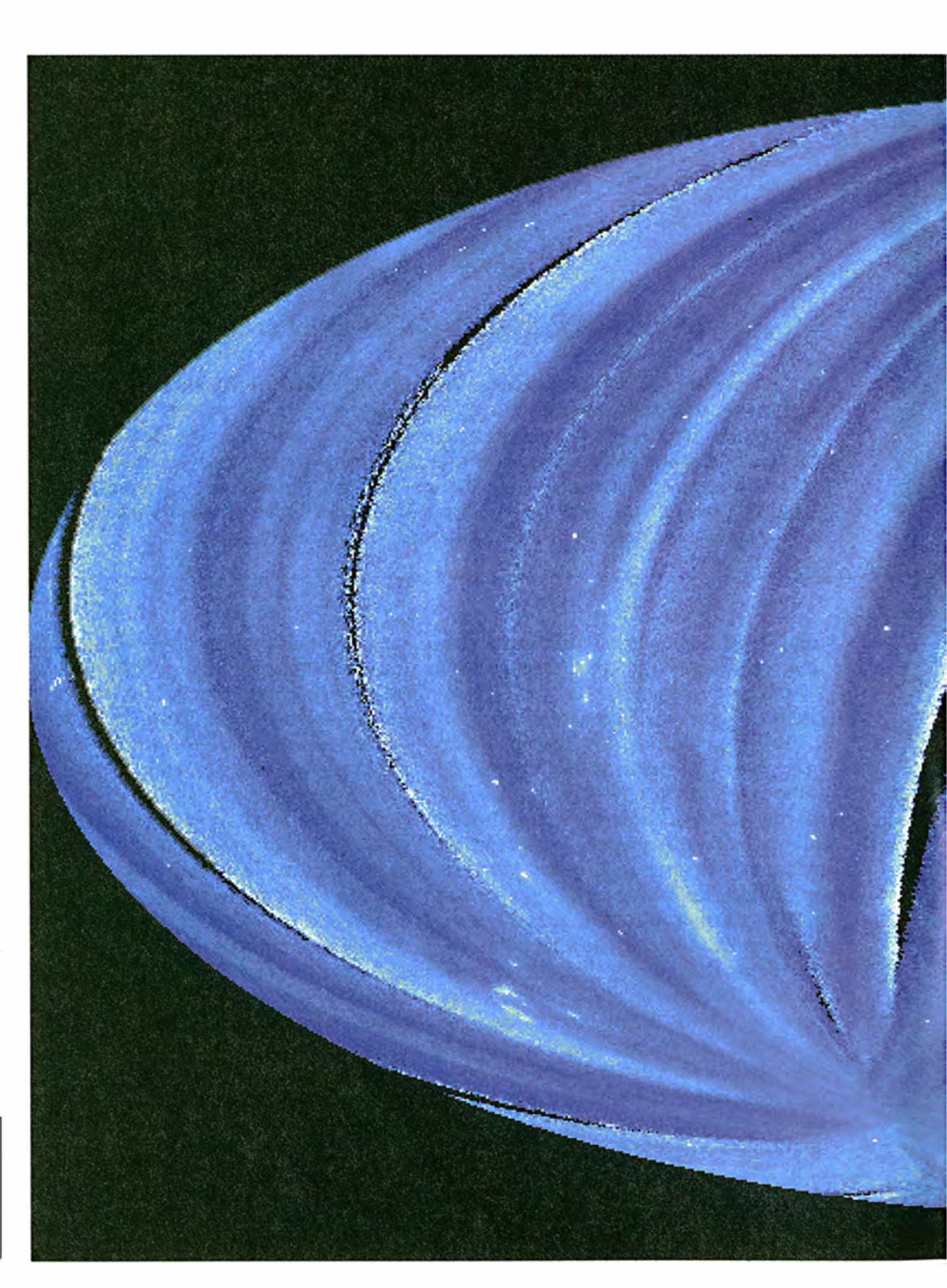
Stuart Bowyer

Mediodía del 7 de junio de 1992. Nervioso y expectante, asisto al lanzamiento, desde cabo Cañaveral, de un cohete Delta II. Porta a bordo el satélite *Explorador en el Ultravioleta Extremo* (*EUVE*) que, una hora después, se sitúa en órbita, a 550 kilómetros de la Tierra.

Las prestaciones del satélite han superado todas las previsiones. Volando muy por encima de la atmósfera, que impide que la radiación del ultravioleta extremo llegue a los telescopios terrestres, el *EUVE* ha detectado múltiples objetos —enanas blancas, estrellas con la corona activa, estrellas de neutrones y objetos planetarios de nuestro sistema solar—, emisores todos de radiación en esa banda de alta frecuencia. Incluso ha detectado diez fuentes de radiación ultravioleta extrema más allá de la Vía Láctea, observación tanto más satisfactoria cuanto más se recuerde la vieja predicción: que el gas interestelar absorbería toda radiación ultravioleta extrema, hasta la procedente de las estrellas próximas, y no digamos ya la de objetos extragalácticos.

En sus dos primeros años de vida, el *EUVE*, primer satélite dedicado a la astronomía del ultravioleta extremo, ha recogido información de importancia crucial sobre diversos cuerpos celestes. Sus observaciones, que nos están obligando a revisar los modelos de las estrellas jóvenes calientes y de las enanas blancas, proporcionan nuevos datos sobre las coronas estelares, el medio interestelar y los planetas del sistema solar.

STUART BOWYER se doctoró en física en 1965 por la Universidad Católica de América. En 1989 fundó el Centro de Astrofísica del Ultravioleta Extremo en Berkeley.



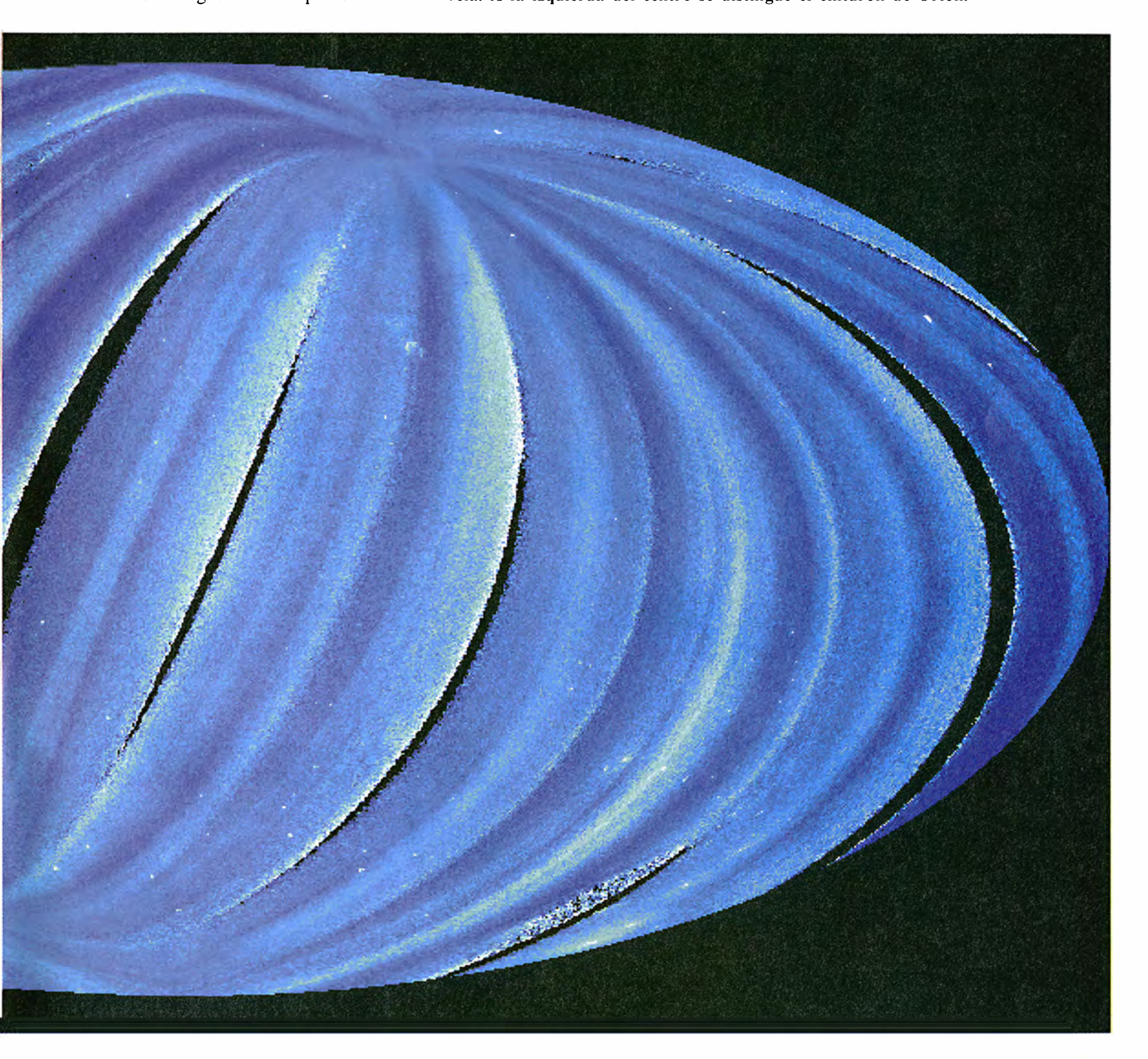
Para el autor y cuantos han trabajado con él en sacar adelante la astronomía del ultravioleta extremo, el *EUVE* y sus descubrimientos representan la culminación de un afán de más de dos décadas. Contra todo pronóstico, nuestros sueños se han hecho realidad.

Durante los años sesenta y principios de los setenta, los astrónomos estaban convencidos de que la radiación del ultravioleta extremo —con longitudes de onda comprendidas entre 100 y 1000 angstroms— sería absorbida por el medio interestelar; esta luz, de emanar de cualquier estrella que no fuese el Sol, no podría alcanzar la Tierra. Se basaba esa idea en una estimación de la densidad promedio del gas en el espacio interestelar: un átomo de hidrógeno por centímetro cúbico, con cantidades menores de helio y otros elementos. Si esta cantidad de materia estuviese distribuida de manera uniforme por la galaxia, sería ciertamente imposible la astronomía en el ultravioleta extremo.

Había también una dificultad técnica. Los instrumentos necesarios para detectar y analizar la radiación en el ultravioleta extremo no existían o estaban aún en una primera fase de desarrollo; me refiero en el laboratorio, no hablemos ya de dispositivos aptos para ser lanzados en un cohete.

La combinación de estos dos factores hizo de la banda del ultravioleta extremo la última frontera de la astronomía observacional.

Y esa frontera me atrajo poderosamente. En cuanto me doctoré en física, con una tesis sobre astronomía de ra-

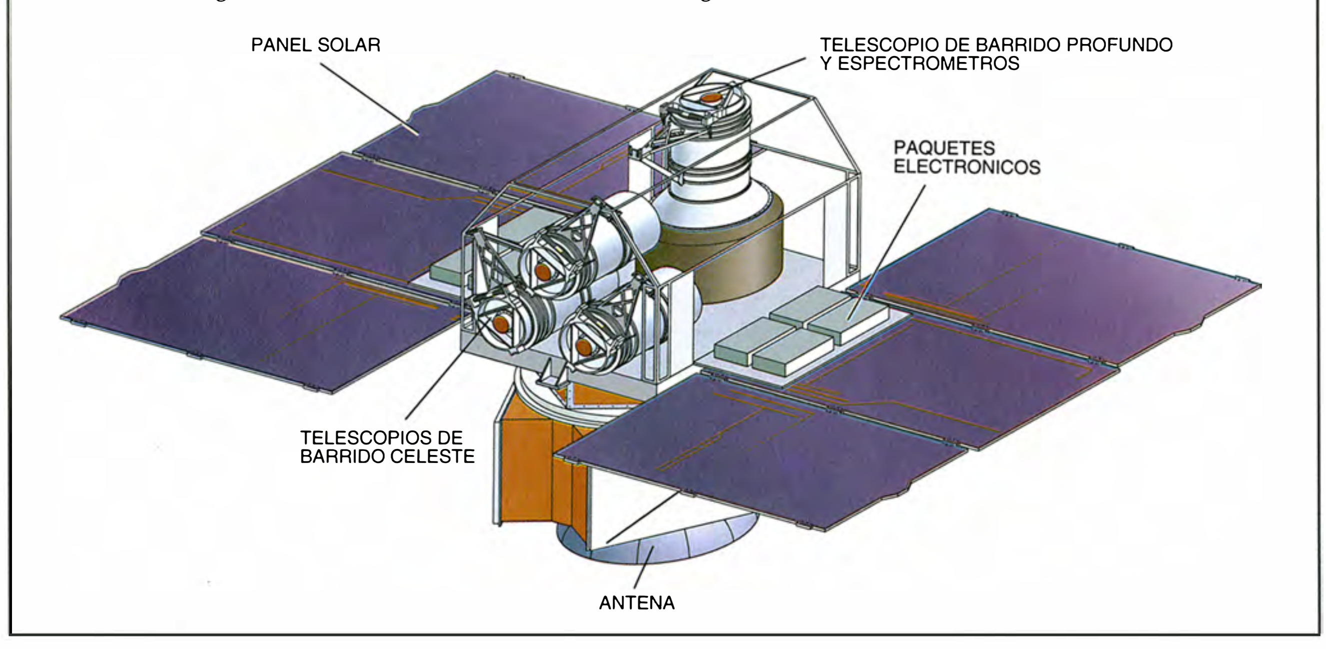


1. ASI BRILLA EL CIELO NOCTURNO en radiación del ultravioleta extremo, de cortas longitudes de onda (unos 100 angstroms). En este mapa se reflejan los datos recogidos por el *Explorador en el Ultravioleta Extremo* (*EUVE*) durante seis meses de observaciones. Cada franja corresponde a una fase continua de toma de datos; las franjas oscuras, que representan los períodos durante los cuales se suspendió el barrido para realizar calibraciones, se han ido rellenando desde entonces. El rasgo circular de la parte inferior izquierda corresponde al residuo de la supernova de Vela. A la izquierda del centro se distingue el cinturón de Orión.

El satélite EUVE

Lanzado en el mes de junio de 1992, el satélite *EUVE* se dedica a la astronomía del ultravioleta lejano. Mostramos aquí el satélite desprovisto de su recubrimiento aislante. Los tres telescopios de "barrido celeste" apuntan en dirección perpendicular al eje de rotación del satélite (*vertical*). El eje está situado en el plano de la eclíptica —en el que la Tierra gira alrededor del Sol— y apunta hacia el Sol y en contra de él. A medida que el satélite gira, los telescopios de exploración barren el cielo perpendicularmente al eje de rotación; en seis meses cartografían todo el firmamento.

El cuarto telescopio, de "barrido profundo", apunta a lo largo del eje de rotación y barre una pequeña franja de cielo en dirección opuesta al Sol. Esta parte del cielo se observa durante tiempos de exposición bastante más largos, con lo que se descubren fuentes aún más débiles de radiación ultravioleta. La mitad de la radiación recogida se dirige a los tres espectrómetros, que están a disposición de los astrónomos invitados de la NASA desde que se completó el barrido. Las observaciones del *EUVE* se prolongarán hasta 1995 y el satélite seguirá en órbita al menos hasta 1999.



yos X, elaboré una instrumentación algo tosca para detectar radiación en el ultravioleta extremo. ¿Podría esa técnica encontrar acomodo en astronomía?

Al poco de mi incorporación en la Universidad de California en Berkeley, en 1967, George B. Field, experto en medio interestelar, propuso que la materia podría hallarse distribuida allí de una manera poco uniforme. En muchas direcciones, su densidad sería quizá de una décima del valor medio. Lo que significaba que, en esas direcciones, la radiación del ultravioleta extremo penetraría diez veces más allá de lo que se suponía; por tanto, y gracias a la luz del ultravioleta extremo, podría observarse un volumen de espacio 1000 veces mayor de lo que solía admitirse. Eso supondría multiplicar por mil el número potencial de las fuentes de ese tipo. "Si George Field puede, con un solo malabarismo teórico, aumentar 1000 veces el número de observaciones posibles en el ultravioleta extremo", me dije, "quién sabe lo que no podría ocurrir en la vida real".

Desde 1968 he dirigido un grupo de investigación en Berkeley sobre ese dominio. En los primeros años, me costó convencer a los astrónomos, y a la NASA en particular, de que apoyasen proyectos encaminados a superar las dificultades técnicas a las que se enfrentaba la astronomía en el ultravioleta extremo. La agencia espacial me concedió una modesta ayuda económica. Me concentré en el uso de cohetes de sondeo —que permanecían por encima de la atmósfera durante tan sólo cinco minutos críticos antes de caer a la Tierra— como medio para poner a prueba y evaluar las técnicas nuevas de la astronomía en el ultravioleta extremo.

A mediados de los años setenta dirigí un proyecto cuyo objetivo era poner en órbita un telescopio, algo primitivo comparado con los que actualmente se fabrican, que realizaría observaciones en el ultravioleta extremo durante el vuelo espacial soviético-americano *Apolo-Soyuz*. La NASA seleccionó nuestra propuesta, y en 1975 el *Apolo-Soyuz* elevó nuestro instrumento más allá de la atmósfera. Encontramos cuatro fuentes de radiación ultravioleta extrema. Dos resultaron ser estrellas enanas blancas calientes y otra una estrella con corona activa. La cuarta se trataba de una estrella variable cataclísmica —un sistema binario, SS Cygni, que ocasionalmente aumenta su luminosidad en un factor de entre 5 y 100. Como las enanas blancas y SS Cygni estaban a una distancia de entre 100 y 200 años luz, el experimento del *Apolo-Soyuz* demostró que la radiación ultravioleta penetra en el medio interestelar y alcanza distancias astronómicas mayores que las hasta entonces supuestas, al menos en algunas direcciones.

El éxito del *Apolo-Soyuz* nos impulsó a seguir avanzando. En respuesta a una convocatoria de la NASA para el diseño de un satélite explorador, presentamos un propuesta de creación de instrumentos capaces de cartografiar el cielo entero en la banda del ultravioleta extremo. La NASA seleccionó nuestro proyecto y empezaron los años de trabajo agotador que culminarían en el *Explorador en el Ultravioleta Extremo*.

No todos los obstáculos fueron técnicos. Los recortes presupuestarios mantuvieron el apoyo económico ini-

cial en un nivel mínimo, y, no obstante el éxito de las observaciones en el ultravioleta realizadas gracias al *Apolo-Soyuz*, un informe de la Academia Nacional de Ciencias en 1979 sugería que la NASA cancelase el *EUVE*. A tenor del informe, no se llegaría a detectar ni una docena de fuentes ultravioletas. Honra a la NASA el que no nos retirase su apoyo.

Efectivamente, las dificultades técnicas eran considerables. Para enfocar, detectar y analizar la radiación ultravioleta de alta energía se necesitan instrumentos diferentes de los que se utilizan con la luz visible. Los mejores telescopios ópticos recogen y enfocan la luz con espejos que la reflejan formando grandes ángulos. Pero si la longitud de onda de la radiación es inferior a 500 angstroms, un espejo así se limitará a absorberla.

Para solucionar este problema, los astrónomos de rayos X emprendieron la creación de telescopios de incidencia rasante. En estos instrumentos, la radiación llega al espejo formando un ángulo casi paralelo a la superficie, y se refleja con un ángulo igualmente pequeño. Se puede usar el mismo ardid para enfocar la radiación del ultravioleta extremo, pero resulta harto difícil construir un espejo de este tipo. Hay que moldear y pulir las superficies del espejo con una precisión esmeradísima; además, sólo algunas de las técnicas empleadas para hacer telescopios ópticos, poco costosas en comparación, pueden aplicarse a los telescopios de incidencia rasante.

Tratándose de un campo que todavía tenía que demostrar su valía, el coste de dar forma y pulir una superficie de cristal para un telescopio de esas características que operase en el ultravioleta resultaba elevadísimo. Con Webster C. Cash, Roger F. Malina y David S. Finley, alumnos míos en Berkeley, me apresté a construir telescopios de metal que sirviesen para la astronomía del ultravioleta. Los fabricamos artesanalmente con aluminio, moldeado y recubierto de níquel (para lograr una superficie que se pudiera pulir bien); luego, a fin de conseguir una reflectividad máxima, los revestíamos de una lámina muy fina de oro.

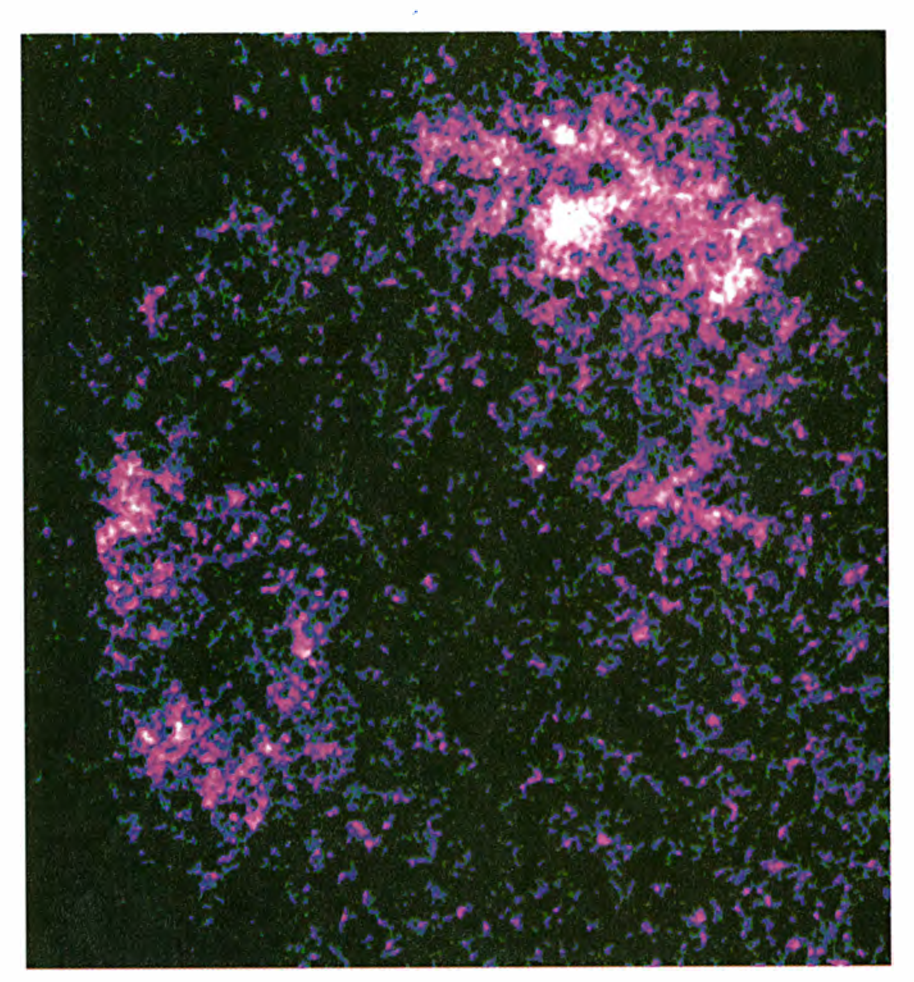
En este proyecto contamos con la ayuda del Laboratorio Nacional Lawrence en Livermore. Mediante la utilización de tornos de tallado con diamante, desarrollados para fabricar armas nucleares, logramos espejos cuyas características los hacían muy superiores a los espejos similares que se habían fabricado en otros lugares. Al final, los nuestros eran casi tan buenos como el espejo de cristal que se lanzó en 1978 a bordo del satélite de rayos X *Einstein* y cuyo precio fue casi treinta veces más elevado.

El desarrollo de los espejos de incidencia rasante para el *EUVE* fue sólo parte de la batalla. También tuvimos que inventar y preparar detectores de la radiación ultravioleta que recogían nuestros telescopios. Diseñamos varios detectores del ultravioleta extremo, todos basados en un principio común. Cada electrón que es liberado por los fotones que llegan se acelera por un tubo capilar —que forma parte de un entramado de tubos adyacentes— y va golpeando a otros electrones, que a su vez causan el desprendimiento de muchos más. Se produce así una cascada de varios millones de electrones a partir de uno solo, inicial.

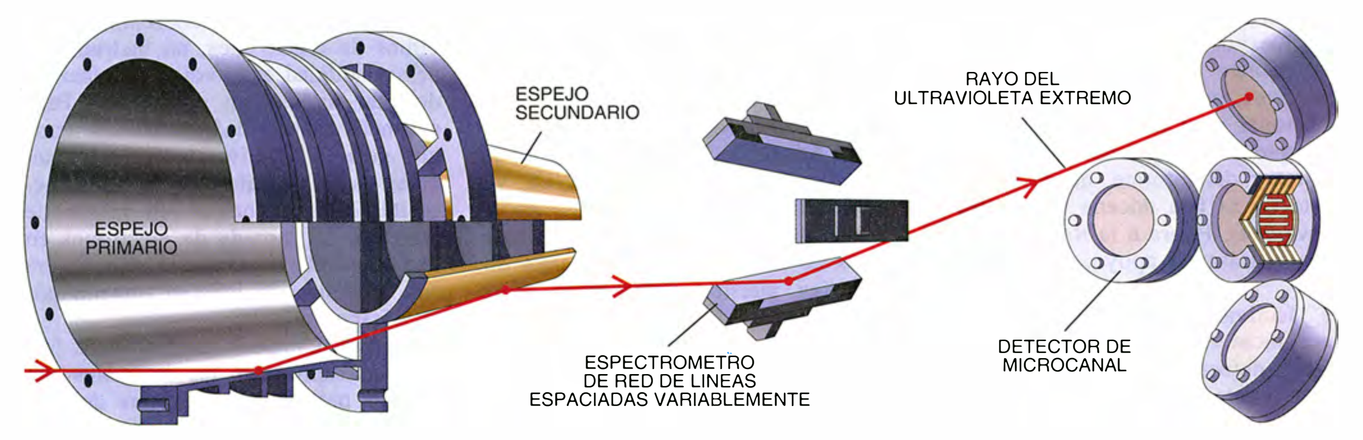
En este principio se apoyan sistemas militares y civiles que proporcionan visión nocturna. Pero su aplicación a la astronomía en el ultravioleta no era tarea fácil. Las fuentes del ultravioleta extremo son debilísimas; hubimos de crear, pues, un instrumento de sensibilidad extraordinaria, capaz de detectar incluso un solo fotón. Pese a tamaña sensibilidad, el detector tenía que generar un nivel bajísimo de señales falsas, aleatorias. Además, necesitábamos encontrar un modo de convertir la cascada de electrones en una señal electrónica que reprodujera con precisión la imagen tomada por el telescopio.

Michael Lampton inventó varias formas de reproducir las imágenes del cielo a partir de las señales del detector. El detector que empleamos en el *EUVE* genera una imagen que define una matriz de 2048 x 2048 píxeles, presenta un ruido interno mínimo y es prácticamente insensible a la radiación ultravioleta de mayores longitudes de onda.

Pero los telescopios y el detector eran sólo un capítulo de la historia. A la larga, fui consciente de que la espectroscopía —la ciencia que analiza la cantidad de radiación que pertenece a las diferentes longitudes de



2. REMANENTE DE LA SUPERNOVA DE VELA, una de las fuentes más brillantes del cielo en el ultravioleta extremo. Sin embargo, es difícil de observar en luz visible. Las manchas más brillantes muestran el gas expulsado cuando explotó la estrella; ahora forma un cáscara expansiva, con una radiación profusa en ultravioleto lejano y en rayos X.



3. LA ASTRONOMIA en el ultravioleta extremo necesita telescopios, espectrómetros y detectores que difieren sustancialmente de los que se emplean en astronomía óptica. Debido a que la radiación de longitudes de onda cortas es absorbida por los espejos que se diseñan para los telescopios ópticos, hubo que emplear espejos de "incidencia rasante". En los que se muestran aquí, la radiación llega a los espejos formando un ángulo diminuto con la superficie. La ilustración muestra cómo los espejos (desprovistos de su recubrimiento) enfocan un haz de radiación ultravioleta en el telescopio de barrido profundo. A continuación, una red de líneas espaciadas variablemente difracta la radiación y la dispersa en sus diferentes longitudes de onda. Por último, el haz es registrado por un detector de microcanal, que puede "ver" incluso fotones de radiación sueltos.

onda— cobraría una importancia vital en el desarrollo de la astronomía del ultravioleta extremo. Por ello, embarqué a cuatro doctorandos en el proyecto —Malina, Patrick Jelinsky, Michael Hettrick y Mark V. Hurwitz—, con la idea de diseñar espectrómetros para el ultravioleta extremo.

El núcleo del dispositivo resultante consta de una red constituida de forma radicalmente diferente, en la que el espacio existente entre las líneas adyacentes aumenta poco a poco de uno a otro extremo. Este espectrómetro de "red de líneas espaciadas variablemente" dispersa la luz de una manera que ofrece ventajas únicas. En esencia, se trata de un dispositivo compacto muy eficaz y de fácil adaptación a los distintos tipos de telescopio.

No obstante los éxitos obtenidos en el laboratorio, todos nuestros instrumentos fueron en un principio diseñados para su utilización a bordo de cohetes de sondeo; y así se configuraron para que cumpliesen las especificaciones que la NASA dicta para que un instrumento sea *digno del espacio* y fueran aptos para su lanzamiento a bordo del *EUVE*. Malina fue elegido por la NASA para dirigir un equipo de expertos con el objetivo de alcanzar esas metas y garantizar el correcto funcionamiento a bordo de los instrumentos.

Mientras tanto, las observaciones que realizaba el *Apolo-Soyuz* habían avivado el interés por la astronomía del ultravioleta extremo en otros lugares del mundo. Un grupo de astrofísicos británicos decidió construir un instrumento para explorar el cielo en la longitud de onda más corta de la banda del ultravioleta extremo. Su Cámara de Campo Ancho, basada en unas técnicas para el ultravioleta extremo desarrolladas en Berkeley, fue diseñada con vistas a que el satélite alemán *ROSAT* la llevase a cuestas. (La misión fundamental de este satélite, bautizado en honor de Wilhelm Röntgen, es la observación de fuentes de rayos X.)

La Cámara de Campo Ancho fue aprobada formalmente en 1980, cuatro años después de que la NASA aprobara el *EUVE*. Sin embargo, el destino hizo que precediera al *EUVE*; se puso en órbita casi dos años antes. La cámara encontró 50 fuentes de radiación ultravioleta de longitud de onda corta. Además de este catálogo de fuentes, los datos también propiciaron algunas revelaciones astrofísicas.

Aunque habíamos planeado gestionar la fase siguiente al lanzamiento de la misión dentro de una de las estructuras operativas ya en Berkeley, se vio claro a finales de los ochenta que el proyecto era de tal magnitud, que las instalaciones y el personal disponible resultaban insuficientes. Persuadí a la universidad para que fundase el Centro de la Astrofísica del Ultravioleta Extremo (CEA).

Cuatro telescopios forman el complejo de instrumentos del *EUVE*. Tres de ellos, los telescopios de barrido celeste, apuntan en la misma dirección. Se construyeron con la idea original de que cada uno se dedicara a una banda diferente de longitudes de onda del ultravioleta extremo, usando unos filtros especiales desarrollados en mi laboratorio. Más tarde diseñamos un cuarto filtro y un hábil sistema de paquetes electrónicos que nos permitirían explorar el cielo ultravioleta en cuatro bandas, en vez de tres. Hubo, pues, que reacondicionar los telescopios de barrido para que se pudieran observar las cuatro bandas.

La dirección en la que apuntan estos telescopios es perpendicular al eje de rotación del satélite *EUVE*. Este eje está en el plano de la eclíptica —la órbita que describe la Tierra alrededor del Sol— y apunta hacia y en contra del Sol. A medida que el satélite va girando, los telescopios examinan una franja del cielo. La franja se desplaza diariamente conforme la Tierra gira alrededor del Sol; se necesitan seis meses para cartografiar todo el cielo.

El cuarto telescopio, de "barrido profundo", está alineado paralelamente al eje de rotación del *EUVE* y por tanto en dirección opuesta al Sol. En seis meses, el telescopio explora una pequeña franja del cielo en el plano de la eclíptica. La exposición prolongada permite una mayor sensibilidad que el barrido principal y revela fuentes más débiles. La mitad de la radiación incidente se utiliza para la observación profunda y la otra mitad se divide en partes iguales y se reparte entre los tres espectrómetros. Puesto que una sola rejilla de difracción puede reflejar eficazmente las longitudes de onda que difieran en un factor dos o tres nada más, se necesitan tres espectrómetros para cubrir la banda del ultravioleta extremo en su totalidad.

En enero de 1993 el *EUVE* completó los primeros barridos del cielo, cubriendo la gama completa de la radiación en el ultravioleta extremo. Para aprehender la ingente cantidad de datos proporcionados por el satélite, tuvimos que solucionar un problema bastante común. Nuestros de-

tectores, además de recoger fotones del ultravioleta extremo, son sensibles también a los rayos cósmicos y a las partículas cargadas capturadas por el campo magnético de la Tierra. Estas partículas originan un fondo, o ruido, al que se superponen las débiles señales astronómicas.

Aunque nos costó lo suyo, ideamos algoritmos fiables que distinguían entre las fuentes reales y las falsas. Por medio de estos programas ya hemos realizado el procesado inicial de los datos tomados de todo el cielo, y hemos encontrado más de 400 fuentes distinguibles que emiten en el ultravioleta extremo. En la siguiente fase de procesamiento se utilizan técnicas aún más refinadas con las que se pueden encontrar hasta 1000 fuentes.

Nuestros primeros resultados demuestran que muchas de las fuentes del ultravioleta extremo detectadas son estrellas con corona activa y enanas blancas calientes. El resto de la cosecha abarca una colección plural de objetos astronómicos: estrellas variables cataclísmicas, estrellas jóvenes calientes, fuentes extragalácticas, restos de supernovas y estrellas de neutrones.

En enero de 1993 el *EUVE* comenzó su segunda fase de funcionamiento: el estudio intensivo de fuentes específicas mediante los espectrómetros. En esta segunda fase participan astrónomos que han logrado convencer a la NASA del valor de sus propuestas científicas. Cada uno de estos observadores invitados estudiará el objeto deseado a lo largo de 10 a 100 horas, durante el "período oscuro" en el que la Tierra protege al satélite de la radiación solar. El *EUVE* puede, mientras gira en su órbita, dirigir su eje hacia un punto del cielo con una precisión mayor de diez segundos de arco, el tamaño angular de una moneda pequeña vista desde una distancia de 700 metros.

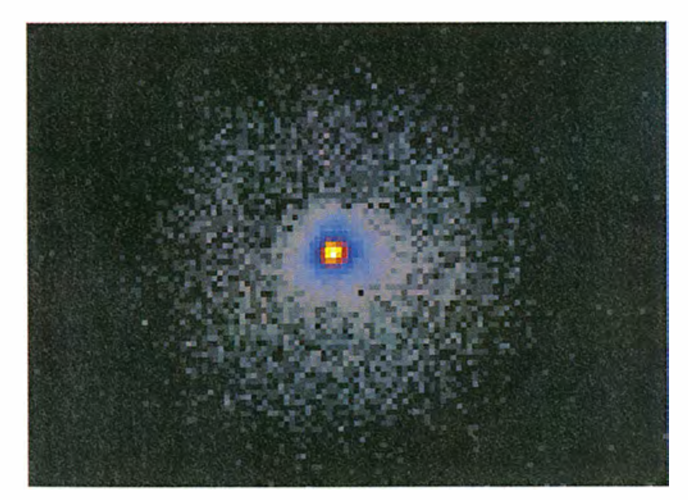
Un grupo de astrónomos, encabezado por Arieh Königl de Chicago, realizó una de las observaciones más apasionantes del *EUVE*. Su descubrimiento tiene que ver con el objeto extragaláctico PKS 2155-304, denominado así porque fue visto por vez primera con el radiotelescopio Parkes, en Australia. Esta galaxia elíptica emite un chorro brillantísimo de materia caliente; parece que lo estamos observando frontalmente. La radiación procedente del chorro domina por completo a los demás tipos de emisión de la galaxia.

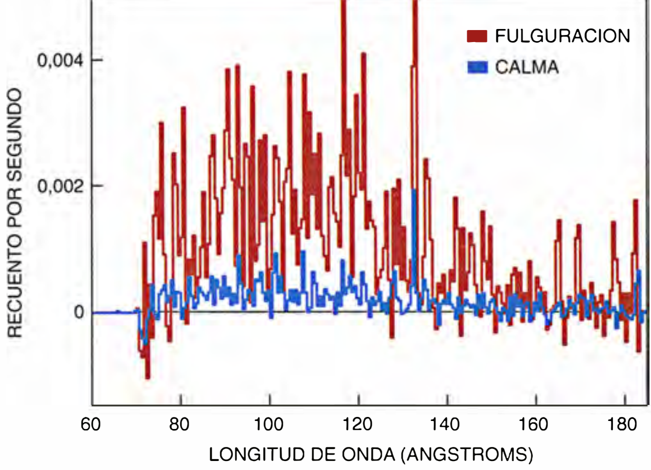
Se sabe que estos "objetos BL Lac" emiten luz en casi todas las longitudes de onda. Su radiación, que carece prácticamente de rasgos distintivos, proporciona muy pocas pistas sobre las condiciones físicas de estos objetos. La espectroscopía realizada por el *EUVE* estableció que PKS 2155-304 es detectable en longitudes de onda de hasta 120 angstroms. Esta observación demostró que la radiación ultravioleta extrema, que supuestamente era incapaz de penetrar en el medio interestelar, podía atravesar distancias intergalácticas. Y lo que revestía mayor interés: se encontraron varios rasgos de absorción en el espectro ultravioleta. El estudio pormenorizado de estos rasgos habrá de llevarnos a un conocimiento más profundo de las condiciones físicas de tales objetos; en particular, averiguar cómo se convierte, en el chorro relativista que estamos observando, la materia que cae hacia el interior del agujero negro situado en el centro de la galaxia.

La mayoría de las fuentes detectadas por el *EUVE* son estrellas de la Vía Láctea que presentan actividad en la corona. En las estrellas normales, nuestro Sol por ejemplo, la corona es un extenso recubrimiento de gas rarificado. La energía que se transporta desde las capas inferiores, más densas y frías, calienta la corona hasta que alcanza uno o dos millones de grados Celsius. Entre la superficie perceptible de la estrella —fotosfera— y su corona, existe una región de transición donde la temperatura asciende de forma brusca. La radiación procedente de esta región consta fundamentalmente de rayos ultravioletas extremos y rayos X. Pero el gas de la región es muy tenue y la energía total emitida es sólo una millonésima parte de la que emana de la fotosfera.

En algunas estrellas la corona emite más energía de lo habitual; su radiación procede de un plasma que alcanza temperaturas más altas que las de una corona normal. Las estrellas con coronas activas nos revelan bastante sobre la naturaleza de esta zona y de la región de transición.

El grupo de Andrea K. Dupree recurrió al *EUVE* para estudiar el espectro de Capella en el ultravioleta extremo. Este sistema, compuesto por dos estrellas gigantes amarillas con coronas activas, está a 45 años luz. El grupo de Dupree ha encontrado fuertes líneas de emisión producidas por iones de hierro —átomos de hierro que han perdido entre 14 y 23 de sus 26 electrones. Las líneas de emisión demuestran que el sistema contiene gas ionizado (plasma) a temperaturas que oscilan entre varias decenas de miles y muchos millones de grados. Existe una sorprendente escasez de plasma cuya temperatura esté cerca del millón de grados. Capella difiere en esto del Sol que, como se sabe,





4. AU MICROSCOPII, estrella de corona activa. Esta imagen pertenece a la banda de longitud de onda corta del telescopio de exploración del cielo (*izquierda*). Se enseña su espectro (*derecha*) en la fase de calma y durante una fulguración. Esta consistió en un agudo pico de radiación ultravioleta que duró dos horas, al que siguió una rama de disipación que duró más de un día.

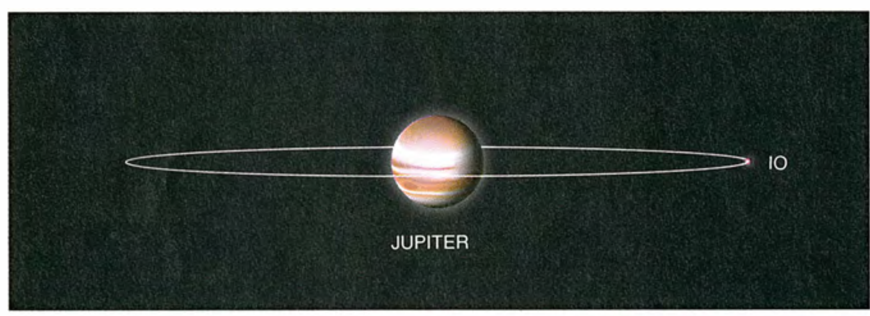
tiene materia abundante a un millón de grados. ¿Cuál puede ser la causa de la escasez material en Capella a esa temperatura? Lo ignoramos.

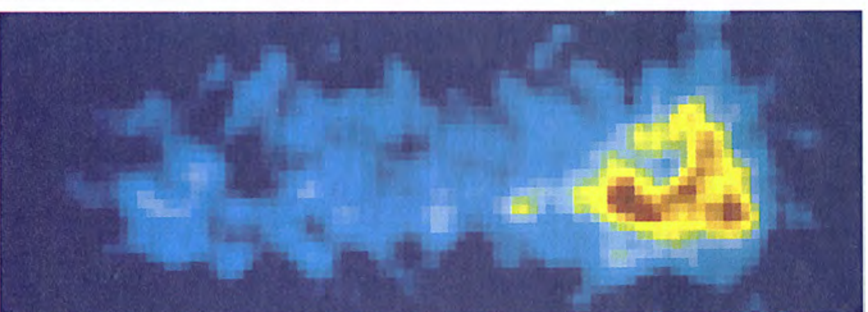
Dupree y sus colegas han observado en el sistema Capella gran cantidad de plasma a temperaturas cercanas a los seis millones de grados; tampoco conocemos el origen de esta materia caliente. Puede que el plasma, encerrado por campos magnéticos, se fusione cerca de una de las estrellas, o de ambas, y produzca energía. O bien la materia podría calentarse por medio de algún tipo de interacción entre las dos estrellas. La observación de las variaciones de la radiación de Capella en el ultravioleta extremo podría ayudarnos a determinar los mecanismos implicados en ese sistema estelar.

En el Sol y otras estrellas se producen frecuentes fulguraciones, o repentinas erupciones de radiación de rayos X o del ultravioleta extremo. Las erupciones que tienen lugar en las estrellas con corona activa hacen que las del Sol parezcan algo modestas. Habían pasado menos de seis semanas tras el lanzamiento del *EUVE* cuando observamos dos grandes fulguraciones en la estrella AU Microscopii, distante unos 30 años luz. En la primera de las fulguraciones, la emisión ultravioleta de AU Mic se multiplicó 20 veces durante algunos minutos, y volvió a su nivel normal de emisión a lo largo de las horas siguientes. Al analizar la radiación procedente de AU Mic con nuestros espectrómetros, detectamos diferencias sustanciales entre las fases de fulguración y calma.

Una de las principales sorpresas de la exploración de todo el cielo que ha realizado el *EUVE* fue el descubrir que Epsilon Canis Majoris, una estrella caliente, joven y compacta de la constelación Can Mayor, es con mucho la fuente ultravioleta más brillante del cielo, pese a distar de nosotros más de 600 años luz. John Vallerga y sus compañeros del CEA encontraron la estrella en la banda de longitudes de onda más alta de la exploración; en esas frecuencias se da la absorción de materia interestelar más acusada. La observación indica que, en dirección a esta estrella, existen menos de 0,002 átomos de hidrógeno por centímetro cúbico, aproximadamente un factor 1000 por debajo del promedio de nuestra galaxia.

El espectro de Epsilon Canis Majoris en el ultravioleta lejano desafía todo lo que sabemos de las atmósferas de las estrellas jóvenes calientes. Joseph P. Cassinelli dirigió un grupo que analizó el espectro de esta estrella, con la esperanza de comprender los vientos que, según indican los estudios en rayos X, parecen emanar de semejantes objetos. La emisión de esos vientos, detectada, se está analizando. Más inesperado aún fue que esa emisión se detectara también en la fotosfera de la estrella.





5. TORO DE IO, un anillo de gas compuesto por oxígeno y iones de azufre. La luna volcánica de Júpiter, Io, emite el gas (*derecha superior*). La imagen del *EUVE* (*abajo*) muestra que uno de los extremos del anillo brilla mucho más que el otro. Como el gas se calienta seguramente a causa del campo magnético de Júpiter, estas observaciones dan pistas sobre la estructura del campo.

Docenas de estudios sobre Epsilon Canis Majoris (en las bandas de radiación del ultravioleta lejano, el visible y el infrarrojo) han confirmado los modelos actuales de este tipo de estrellas. Pero el flujo en el ultravioleta extremo que emana de la fotosfera de la estrella sobrepasa en un factor 30 las predicciones de estos modelos. Aunque los astrofísicos han conjeturado cuáles puedan ser las causas de este exceso, no se ponen de acuerdo.

Epsilon Canis Majoris ha ofrecido también la clave para explicar la ionización del medio interestelar. Se produce dicha ionización cuando un átomo interestelar absorbe un fotón, que libera uno de los electrones del átomo. La radiación ultravioleta de esta estrella es tan intensa que, en el correspondiente cuadrante del cielo, la estrella es la causa dominante de la ionización del medio interestelar. Se está investigando la naturaleza del medio interestelar contando ya con ese nuevo resultado.

Cuando la luz del ultravioleta extremo produce ionización, queda absorbida aquélla en el proceso. En la radiación de una fuente astronómica, esta absorción se manifiesta en forma de líneas oscuras, o a través de un borde de absorción que aparece en el espectro. El estudio de estos efectos nos proporciona información sobre la temperatura del medio interestelar y la densidad y el grado de ionización de cada uno de sus elementos. Los principales elementos que absorben radiación del ultravioleta extremo son el hidrógeno, los átomos de helio y los átomos de helio ionizados una vez. Mis colaboradores y yo hemos estudiado en el CEA esta absorción en el espectro del ultravioleta extremo de una enana blanca, GD 246, que se encuentra a unos 200 años luz. En la línea de visión de esta estrella, los átomos de hidrógeno tienen una densidad media de unos 0,04 por centímetro cúbico, y casi un 25 por ciento del helio está ionizado.

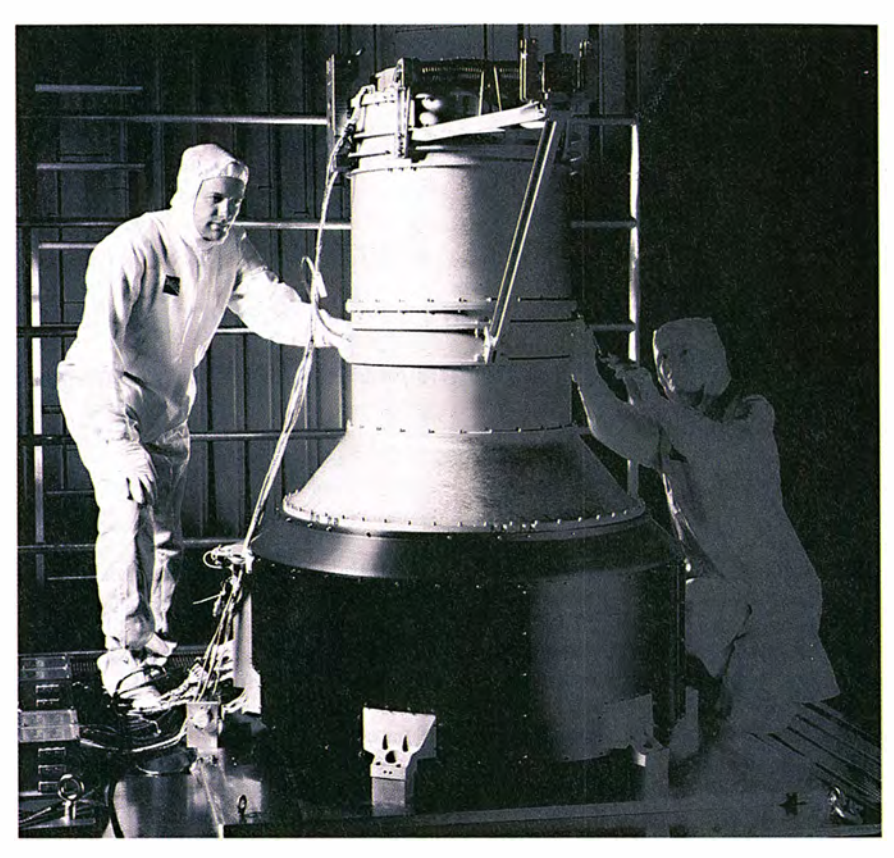
El espectro continuo que produce una enana blanca es ideal para llevar a cabo estos estudios. Hemos realizado observaciones similares en torno a una docena de enanas blancas vistas en diferentes direcciones. El análisis de estos resultados nos servirá para inferir el estado de ionización general del medio interestelar, datos de suma importancia para conocer la evolución seguida por ese material. Debería revelarnos, en última instancia, cómo aparecen las concentraciones de gas interestelar y cómo se forman nuevas estrellas.

Las enanas blancas calientes, la segunda clase de fuentes más numero-

sa del ultravioleta extremo, nos han abierto su propia caja de sorpresas. Los espectros en el ultravioleta extremo de muchas estrellas de ésas han resultado ser mucho más débiles de lo que habían predicho los astrofísicos, lo que nos obliga a revisar nuestros modelos de las atmósferas de las enanas blancas. Merece la pena detenernos un instante para ver por qué se esperaba que las enanas blancas dominaran el cielo en la banda del ultravioleta extremo y por qué no se ha cumplido esta predicción.

Una enana blanca contiene una masa más o menos igual a la del Sol apiñada en un volumen igual al de la Tierra; en su superficie se produce, pues, una fuerza gravitatoria enorme, unas 100.000 veces la fuerza de la gravedad en la Tierra. Durante 50 años, los teóricos dieron por sentado que semejante campo gravitatorio forzaría el hundimiento del material más denso de la enana blanca, dividiéndose la atmósfera en dos capas de diferente composición. Todos los elementos pesados quedarían en el centro, y las capas externas de la enana blanca constarían de hidrógeno casi puro o de helio casi puro.

En teoría, cualquier enana blanca cuyas capas exteriores fueran de hidrógeno o helio puro debería emitir cantidades ingentes de radiación ultravioleta. Pero las observaciones realizadas por el *Apolo-Soyuz*, por el *EXOSAT* (satélite de rayos X habilitado para realizar algunas observaciones en el ultravioleta) y por el *EUVE* han revelado la existencia de cantidades muy modestas de esta radiación.



6. PREPARACION del telescopio de barrido profundo y de los espectrómetros para su instalación a bordo del *EUVE*. El telescopio toma largas exposiciones del cielo en la dirección de la sombra de la Tierra. Los espectrómetros reciben la luz desde las secciones de un mismo espejo y analizan la radiación de las fuentes individuales en sus longitudes de onda componentes.

Stephane Vennes, del CEA, había señalado con anterioridad que las enanas blancas podrían presentar un déficit de radiación en el ultravioleta extremo. La espectroscopía realizada por el *EUVE* demostró su acierto. La luz ultravioleta emitida desde las regiones inferiores de la atmósfera de la enana blanca impulsa los iones de hierro hacia la alta atmósfera: el hierro absorbe los fotones, cuya cantidad de movimiento produce una presión de radiación en dirección ascendente. Los iones se elevan hacia la superficie, donde reducen sustancialmente la cantidad de radiación ultravioleta que emite la enana blanca.

Los datos recogidos por el telescopio de barrido profundo han suministrado información acerca de la radiación de fondo de altas energías, que se creía era generada por la materia caliente del medio interestelar. Queda mucho por saber sobre el origen, estabilidad y las características de esta materia caliente. Un equipo del CEA encontró un atisbo de la misma en el fondo difuso, producida por una nube en forma de cirro que, pese a ser muy tenue, absorbe completamente la radiación ultravioleta procedente de lugares más distantes.

Toda la radiación del ultravioleta extremo que hemos podido detectar en la dirección de la nube emana de una región definida muy claramente, situada entre la Tierra y la nube. Contamos con la ayuda de Jens Knude, quien determinó que la nube dista 120 años luz. Apoyados en esta información, calculamos directamente la presión del medio interestelar caliente. Resultó ser altísima, en comparación con las estimaciones indirectas anteriores, que situaban el valor de este parámetro entre 700 y 6000 kelvin por centímetro cúbico; la cifra resultó ser 19.000 kelvin.

El propio campo de la física planetaria, archiexplorado, se ha visto beneficiado con las aportaciones del *EUVE*. Un grupo dirigido por H. Warren Moos y Doyle T. Hall, ha obtenido imágenes sorprendentes en el ultravioleta extremo del toro de plasma que circunda a Júpiter. Los vuelos de aproximación del *Voyager* en 1979 revelaron que el toro está compuesto principalmente por oxígeno y iones de azufre emitidos tiempo atrás por Io, la luna volcánica de Júpiter. Las imágenes del ultravioleta extremo muestran que uno de los lados del toro brilla más, lo que significa que el gas de ese lado se encuentra en un medio más denso y caliente. Como la compresión y el calentamiento son seguramente consecuencia del movimiento del gas dentro del campo magnético de Júpiter, las observaciones del toro de Io proporcionan pistas valiosísimas sobre la estructura de la magnetosfera de Júpiter.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

VARIABLE LINE-SPACE GRATINGS: NEW DESIGNS FOR USE IN GRAZING INCIDENCE SPECTROMETERS. Michael C. Hettrick y Stuart Bowyer, en *Applied Optics*, volumen 22, n.º 24, págs. 3921-3924; 15 de diciembre de 1983.

EXTREME ULTRAVIOLET EXPLORER MISSION. Número especial del *Journal of the British Interplanetary Association*, vol. 46, nº. 9; septiembre de 1993.

ASTRONOMY AND THE EXTREME ULTRAVIOLET EXPLORER SATELLITE. Stuart Bowyer en *Science*, vol. 263, págs. 55-59; 7 de enero de 1994.

Microscopía confocal

Esta técnica microscópica no tiene rival para la producción de imágenes nítidas, sean planas o en tres dimensiones

Jeff W. Lichtman

Marvin Minsky es el padre de la inteligencia artificial. También es autor de otro importante logro. En los años cincuenta construyó un microscopio óptico revolucionario, que le permitía observar con claridad capas sucesivas de una muestra sin tener que rebanar el espécimen en finos cortes. Minsky no recibió el debido reconocimiento cuando patentó su "microscopio de barrido por etapas, de doble enfoque". En los diecisiete años de vigencia de la patente, no percibió derechos ni royalties, y no se fabricó ningún instrumento de concepción similar.

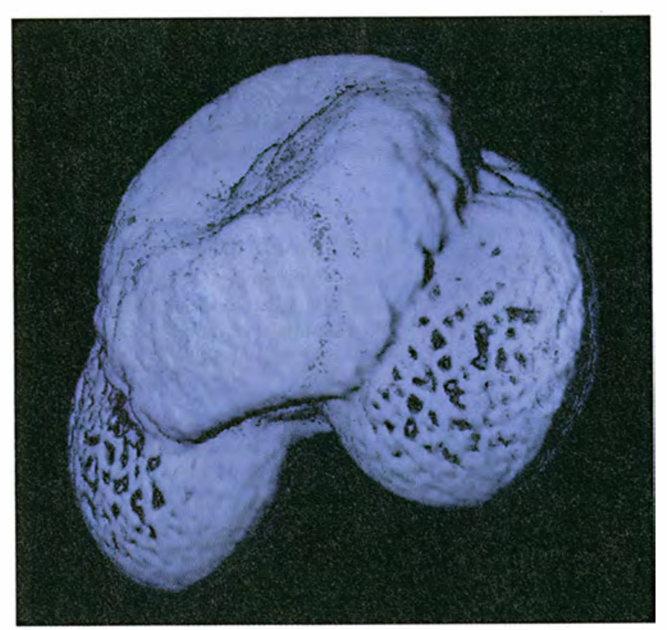
Treinta años después, su método —hoy denominado "microscopía confocal"— ha prendido con fuerza y se ha tomado la revancha, hasta convertirse en uno de los progresos más notables de la microscopía óptica de nuestro siglo. No está claro si el interés que suscita ha sido encendido por el redescubrimiento de los primeros trabajos de Minsky o por la reinvención de su idea por otros. Sea como fuere, el feliz resultado es que ahora contamos con docenas de tipos de microscopios confocales, en una gama que va desde lo rudimentario hasta lo barroco.

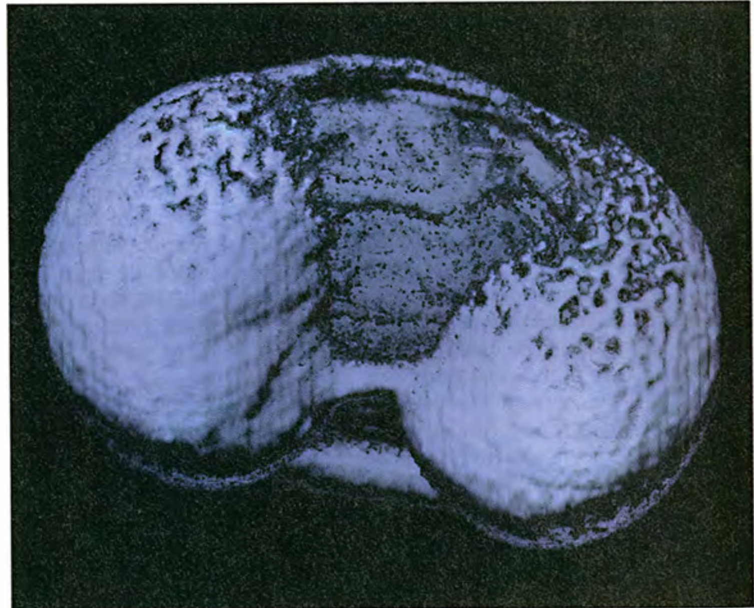
Minsky desarrolló la técnica mientras reflexionaba sobre el funcionamiento del cerebro. Razonó que, si fuera posible cartografiar las conexiones entre todas las neuronas, el diagrama circuital revelaría indicios del modo en que opera el cerebro. Por desdicha, al aplicar las técnicas de la microscopía óptica ordinaria a la identificación de las sutiles interconexiones de las neuronas de un corte cerebral se tropieza con un grave obstáculo técnico.

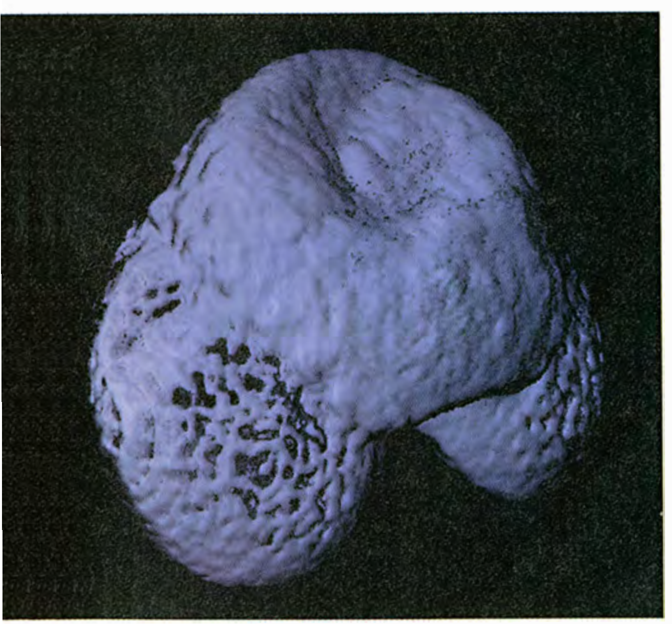
En los microscopios ópticos, cuando el objetivo enfoca

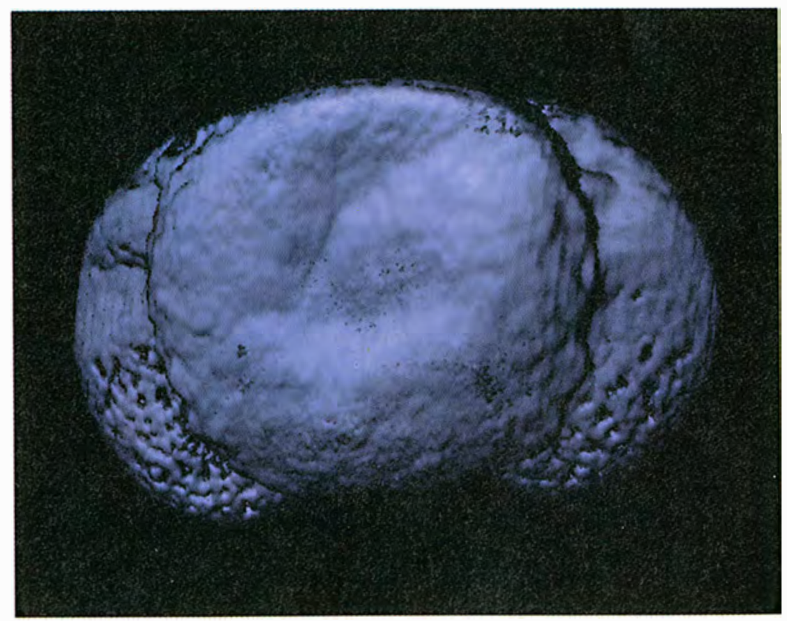
JEFF W. LICHTMAN se doctoró por la Universidad de Washington, en cuya facultad de medicina enseña ahora neurobiología. Dedica buena parte de su tiempo a estudiar las modificaciones que experimentan a largo plazo la estructura y la función de las sinapsis. Lichtman es también inventor de equipos de microscopía y posee varias patentes sobre microscopios confocales y sus componentes.

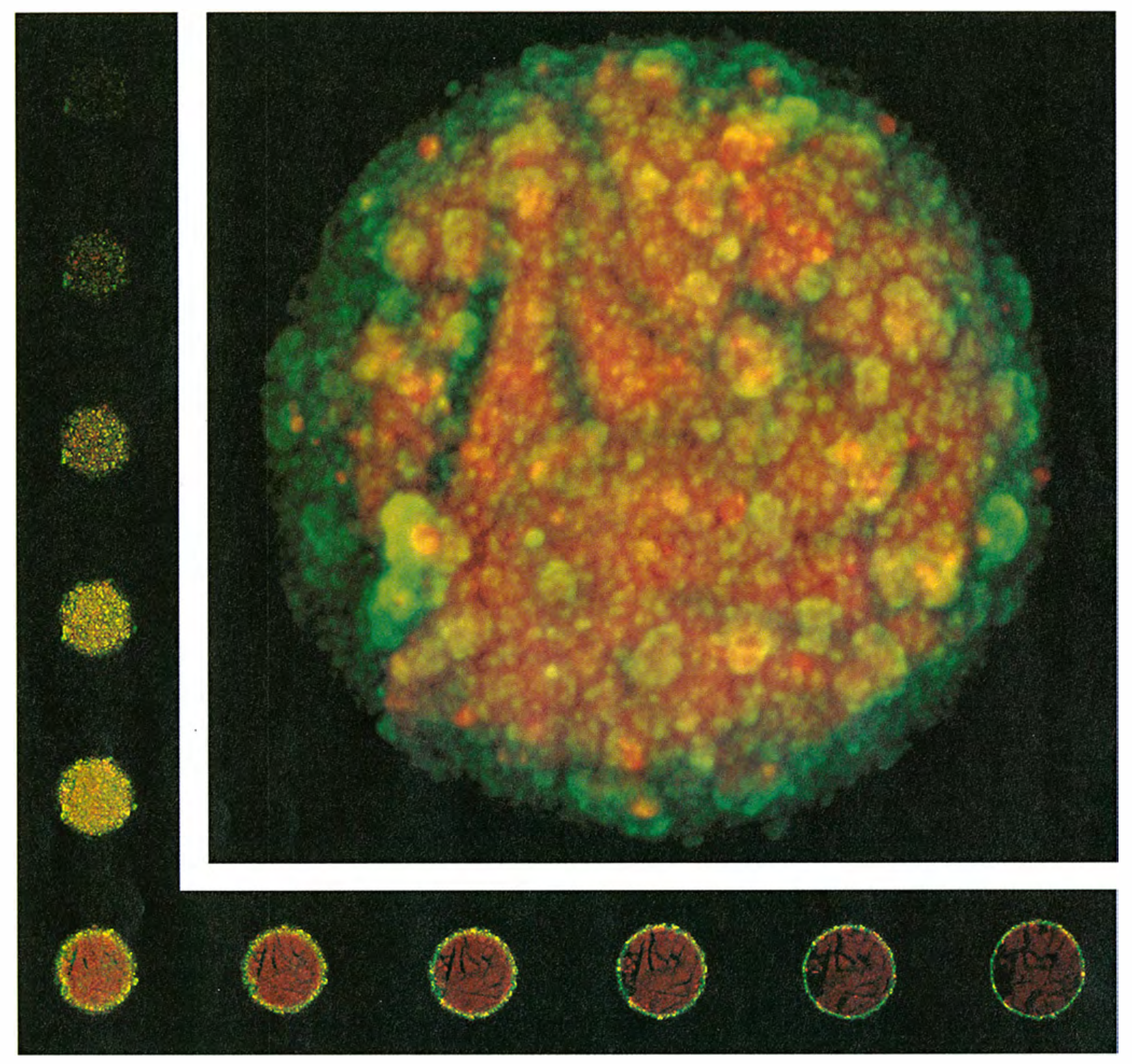
1. GRANOS DE POLEN de girasol (*arriba*) y de pino (*serie inferior*). Estos "retratos" han sido preparados a partir de imágenes obtenidas con un microscopio confocal de planos sucesivos de cada grano. Un ordenador digitizó dichas imágenes —llamadas secciones ópticas— y las combinó. Tales reconstrucciones digitales pueden observarse en cualquier orientación; el polen de pino se muestra (*de izquierda a derecha*) en vista lateral, en vista lateral opuesta, girado 72 grados respecto a la primera posición y desde arriba.











2. UNA MICROCAPSULA DE POLIMERO rellena de fluido (*esfera grande*), de 0,1 milímetros de diámetro. La imagen se obtuvo a partir de una pila de secciones ópticas, entre las que se contaban las esferas menores aquí mostradas. Las imágenes fueron preparadas por Matthew H. Chestnut, de Procter & Gamble, para comparar la integridad estructural de esta cápsula con la de otras que poseen diferente composición. Se distingue la cápsula (*en verde*) del fluido que la llena marcando estos componentes con tintes diferentes. El análisis detallado de muchas vistas no reveló roturas en la cápsula, pero sí ciertas fugas del fluido interior.

luz tomada de planos situados por debajo de la superficie del tejido cerebral (o de cualquier material grueso y translúcido), la imagen se torna rápidamente incomprensible. Tratar de ver elementos nerviosos profundos de tal tejido equivale a tratar de localizar un objeto hundido en una charca cenagosa proyectando sobre el agua una linterna: la luz es reflejada por tantas y tan diminutas partículas que resulta imposible distinguir el objeto de su entorno.

Para conseguir una representación nítida de un plano individual de una muestra, lo ideal sería recoger luz reflejada del plano de interés y sólo desde él. Pero el material situado por encima y por debajo de ese plano también devuelve luz, creando imágenes borrosas. Al mismo tiempo, el fenómeno de dispersión puede reducir el contraste. La dispersión se produce al incidir la luz sobre partículas diminutas y reflejarse de ellas, incidiendo de nuevo en otras partículas y así hasta alcanzar la superficie detectora. Las señales producidas por esta luz desviada al azar no aportan información; crean un resplandor difuso que tiende a encubrir la luz procedente del plano de interés.

Con unas pocas modificaciones en el microscopio normal, Minsky minimizó la difuminación de la imagen y reforzó el contraste. Evitó que se produjera gran parte de la dispersión; para ello, hizo pasar la luz de iluminación a través de un objetivo que enfocaba los rayos en un haz bicónico, cuya forma recuerda un reloj de arena. Después llevó el foco de este haz (la angostura en el reloj de arena), que es un punto de luz nítido e intenso, sobre una porción mínima de la muestra, a la profundidad deseada. Tal proceder garantizaba que esa

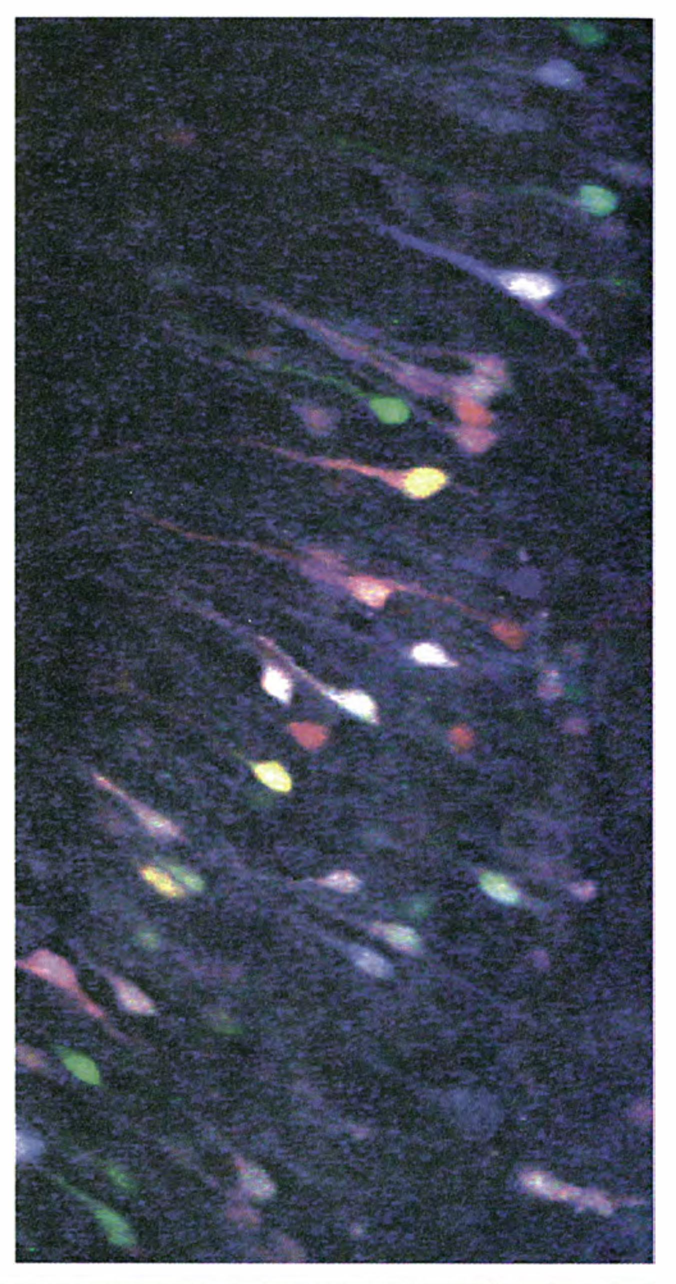
zona sería la más intensamente iluminada del espécimen y, por tanto, la que reflejase más luz. Igual de importante, al enfocar un área, Minsky garantizaba que el resto de la muestra apenas recibiría iluminación, suprimiendo con ello la dispersión. La microscopía óptica al uso iluminaría la muestra entera y se desviaría la luz incidente.

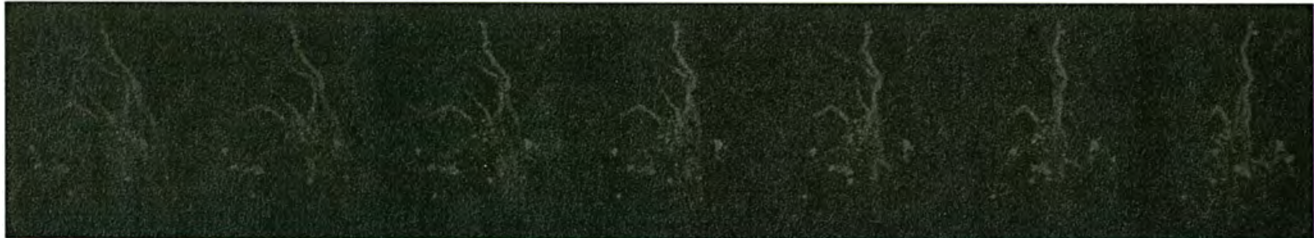
La estrategia de enfocar la iluminación sobre una región circunscrita limitaba la dispersión total. Pero no impedía que la luz fuese devuelta y dispersada por el tejido iluminado suprayacente e infrayacente a la zona de interés (el tejido que se encuentre dentro de las porciones cónicas del haz iluminador). Gracias a un segundo ajuste, Minsky impidió también que gran parte de esta luz espuria alcanzase la superficie detectora; sabía que la luz devuelta era enfocada por el objetivo en un plano situado muy por encima de la muestra. Colocó en ese plano una máscara con una abertura diminuta, que dispuso de modo que la luz de retorno pasara a su través hasta la superficie detectora. El resultado fue impresionante: la señal procedente del punto iluminado pasaba íntegra a través del orificio de la pantalla y alcanzaba la superficie detectora; al propio tiempo, la máscara eliminaba casi toda la luz procedente del tejido exterior al punto. Se formaba así una imagen casi perfecta del punto, esencialmente no perturbada por la dispersión ni difuminada por la luz procedente de zonas no enfocadas.

El problema obvio que planteaban las dos primeras fases del método de Minsky era que éstas proporcionaban una imagen nítida, sí, pero sólo de un punto diminuto. Para producir una representación del plano entero, añadió una característica más: la exploración secuencial por líneas, o "barrido". Corrió la muestra poquito a poco, barriendo el plano de enfoque con el punto luminoso a lo largo de líneas paralelas inmediatas. Al final, cada una de las áreas yacentes a una profundidad dada visitaba el haz iluminador fuertemente concentrado, enviando en secuencia una señal clara a través del orificio filtrante hasta el detector. Minsky maniobraba la muestra con dos diapasones electromagnéticos de horquilla. Uno lo desplazaba a lo largo de cada línea y el otro lo hacía pasar de una línea a la siguiente paralela del plano.

Para ver la imagen completa de un plano, hacía que la luz que atravesaba el orificio incidiera en un detector fotomultiplicador. Este detector, a su vez, generaba un flujo de señales eléctricas con las que se confeccionaba una imagen en una pantalla de larga persistencia, tomada de un radar. Subiendo o bajando el objetivo y repitiendo el proceso de barrido, aparecía en la pantalla otro plano de la muestra. La elección de una pantalla grande fue un error táctico. Cuando Minsky les pedía a sus colegas que examinaran el artilugio, éstos solían tener dificultad en interpretar la imagen que estaban viendo. Como Minsky dedujo más tarde, la imagen presentada era excesivamente grande.

4. NEURONAS ACTIVAS (*objetos coloreados*) resaltadas en este corte de tejido cerebral de un roedor. La figura es una compilación, generada por ordenador, de tres imágenes confocales realizadas, con 12 segundos de diferencia, por Michael E. Dailey y Stephen J. Smith. Cada punto temporal se codificó mediante un color, rojo primero, verde luego y por fin azul. La imagen nos revela que las neuronas se excitaron en instantes distintos y se mantuvieron activas durante dos de los pulsos (así la célula amarilla) o durante los tres (*blanca*).

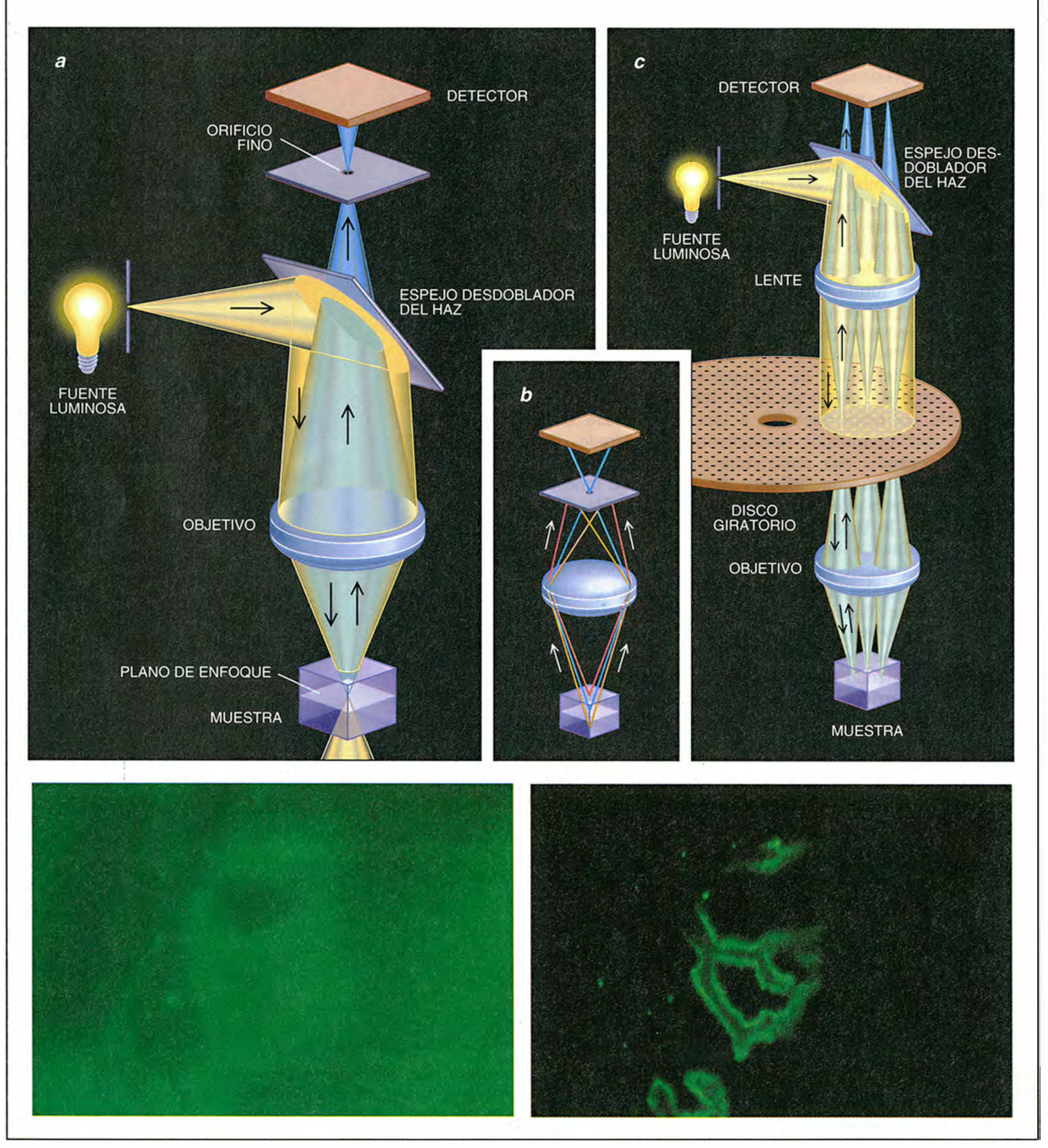


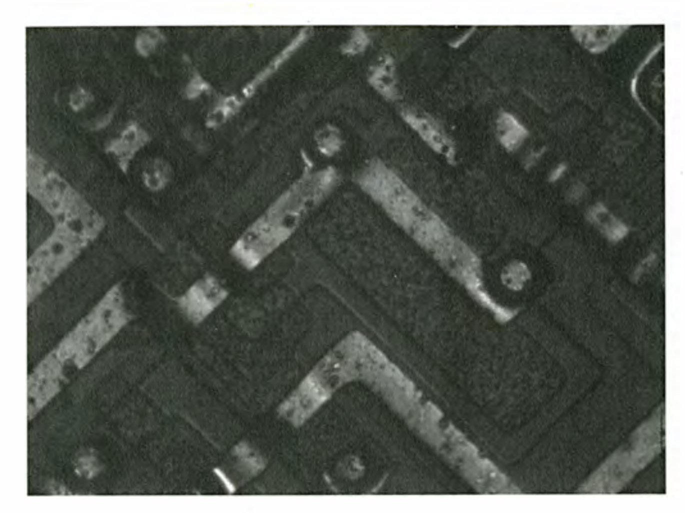


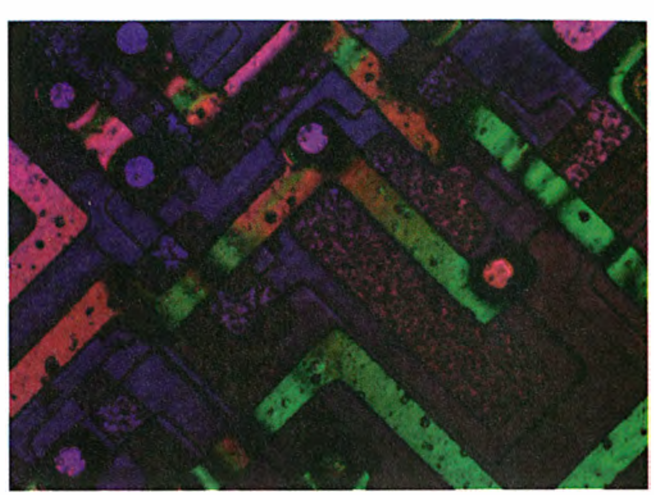
3. LA RECONSTRUCCION TRIDIMENSIONAL de una neurona es la "estrella" de esta secuencia de fotogramas. La estructura que vemos en los sucesivos cuadros está girada unos 10 grados en torno a un eje vertical con respecto a la anterior. La secuencia produce un film de la célula en rotación. Para ver la neurona en tres dimensiones, mire con los ojos bizcos un par de imágenes, enfocando cada ojo en una imagen diferente.

Así funciona la microscopía confocal

Los microscopios confocales consiguen elevada resolución en un plano seleccionado merced a tres procesos fundamentales. En el primero, se enfoca luz (*amarilla en a*) mediante una lente objetivo, creando un haz bicónico cuyo vértice o foco ilumina una zona de la muestra, a la profundidad deseada. A continuación, la luz reflejada por esa área (*azul*) es enfocada y concentrada en un punto, permitiéndosele que pase en su totalidad a través de una abertura de una máscara situada frente a un dispositivo detector. Las regiones opacas que rodean al orificio de filtrado cierran el paso a los rayos reflejados por la regiones suprayacentes (*en rojo en b*) e infrayacentes (*en naranja*) del plano de interés. Por último, la luz se traslada de una zona a otra hasta explorar el plano por completo. La nitidez que esta técnica proporciona resulta evidente en las fotografías al pie, obtenidas, respectivamente, con un microscopio tradicional (*izquierda*) y con uno confocal (*derecha*). Ambas imágenes corresponden a un mismo músculo de ratón, marcado por fluorescencia para resaltar los puntos que entran en contacto con una neurona motora. Para acelerar el barrido, se incorpora un disco provisto de cientos de finos orificios, a través de los cuales se envía y recoge la luz (*c*).







5. LA TEXTURA SUPERFICIAL de una pastilla ("chip"), mostrada en una micrografía óptica normal (*izquierda*) y en una imagen confocal compuesta (*derecha*). En esta última se han superpuesto los barridos a tres profundidades. El nivel más profundo es verde; el más alto, rojo. La imagen confocal proporciona información que no es posible captar en la microfotografía convencional.

"Les mostré el microscopio confocal a muchos visitantes, pero nunca parecieron muy impresionados con lo que veían en la pantalla de radar", cuenta. "No caí en la cuenta hasta mucho después de que no basta sólo con que un instrumento posea elevado poder de resolución; es preciso también que la imagen parezca nítida. Tal vez el cerebro humano precise de cierto grado de compresión foveal para aplicar sus facultades visuales más sobresalientes. En cualquier caso, debí haber utilizado película fotográfica ¡o cuando menos, haber instalado una pantalla más pequeña!" Pero Minsky no hizo ni lo uno ni lo otro.

Investigadores y fabricantes han ideado muchos métodos para combinar las características esenciales de la microscopía confocal: iluminación de una pequeña porción de la muestra, filtrado de la luz de retorno a través de una abertura alineada con la región iluminada y barrido del espécimen. La muestra suele permanecer quieta; en casi todos los dispositivos es el haz luminoso el que viaja. Para acelerar la velocidad de adquisición de la imagen, algunos microscopios desplazan el haz con espejos oscilantes, que obligan a la luz incidente en ellos a fluir raudamente a través de una muestra, que es barrida como barre el rayo electrónico la pantalla de un televisor. Estos espejos permiten reconstruir una imagen en menos de un segundo. Tales instrumentos exigen fuentes luminosas de más brillo que las que Minsky tenía a su disposición; después de todo, han de producir de cada zona una señal que sea detectable casi instantáneamente. Los láseres, muy intensos y fáciles de enfocar en zonas pequeñísimas, se utilizan para este propósito.

Para ahorrar tiempo se emplean también múltiples puntos de luz que exploren simultáneamente diferentes regiones de la muestra. Algunos de estos dispositivos incorporan discos giratorios provistos de muchas aberturas, a través de las cuales pasa la luz de iluminación y la de retorno. Otros equipos se valen de sistemas de rendija, que abrevian el tiempo de barrido iluminando líneas en vez de puntos. Las técnicas de barrido rápido han permitido la observación de planos completos de un espécimen en tiempo real, muchas veces, directamente a través de un ocular.

Casi todos los microscopios confocales modernos sacan partido de otro avance revolucionario: el procesamiento digital de imágenes. Conforme un microscopio confocal barre planos sucesivos de la muestra, produce una pila de imágenes, cada una de las cuales constituye una sección óptica; tales secciones vienen a ser imágenes de finos cortes. Los programas de procesamiento de imágenes no sólo registran el brillo de cada zona de cada sección, sino también la ubicación de esa área en la muestra, o sea, su localización en un plano individual (las coordenadas x e y) así como la profundidad de éste (la coordenada z). Los lugares definidos mediante la terna de coordenadas se llaman "vóxeles", equivalentes en tres dimensiones de los elementos de imagen, o "píxeles" de una imagen bidimensional.

Los programas de procesamiento de imágenes compilan vóxeles y preparan con ellos reconstrucciones tridimensionales de objetos microscópicos. También manipulan vóxeles, lo que permite hacer girar alrededor de un eje las imágenes reconstruidas y observarlas desde todos los ángulos. Gracias a esta técnica nos es dado efectuar rápidamente observaciones que de otra forma hubieran resultado sumamente caras y laboriosas. Por ejemplo, en investigación cerebral, los sistemas de microscopios confocales conectados a ordenadores han resultado valiosísimos para descubrir la estructura del sistema nervioso, y en ellos se apoya la observación de tejidos cerebrales vivos.

La microscopía confocal se ha convertido en una aglutinación ultrarrefinada de láseres, instrumentos ópticos, sistemas electromecánicos de barrido y de procesamiento informático de imágenes. Ha dado a la microscopía la capacidad de ver el interior de los objetos y de crear, casi a voluntad, imágenes estereoscópicas. El sueño de Minsky —la cartografía microscópica de los circuitos cerebrales— parece estar cobrando realidad.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

AN EVALUATION OF CONFOCAL VERSUS CONVENTIONAL IMAGING OF BIOLOGICAL STRUCTURES BY FLUORESCENCE LIGHT MICROSCOPY. J. G. White, W. B. Amos y M. Fordham, en *Journal of Cell Biology*, vol. 105, n.º 1, páginas 41-48; julio de 1987.

MEMOIR ON INVENTING THE CONFOCAL SCANNING MICROSCOPE. M. Minsky en *Scanning*, vol. 10, n.º 4, páginas 128-138; julio/agosto de 1988.

HIGH-RESOLUTION IMAGING OF SYNAPTIC STRUCTURE WITH A SIMPLE CONFOCAL MICROSCOPE. J. W. Lichtman, W. J. Sunderland y R. S. Wilkinson en *New Biologist*, vol. 1, n.º 1, páginas 75-82; octubre de 1989.

CONFOCAL MICROSCOPY. Recopilación de Tony Wilson. Academic Press, 1990.

Ciencia y sociedad

Espectáculo astronómico

Shoemaker-Levy 9 sobre Júpiter

Entre los días 16 y 21 de julio de 1994, los astrónomos hemos asistido a un hermoso espectáculo que ha decepcionado a muy pocos y ha sorprendido a muchos. En este período, diversos fragmentos del otrora cometa Shoemaker-Levy 9 han ido estrellándose en sucesivos impactos contra la densa atmósfera de Júpiter, provocando un rosario de explosiones sobre la superficie del planeta.

Nuestra sorpresa fue indescriptible cuando a las 20:25 T.U. (21:25 hora insular canaria) del día 16 apreciamos lo que sería la primera señal de lo que nos esperaba. El fragmento A del cometa —en principio pequeño e indetectable en el óptico— caía sobre Júpiter, liberando una enorme cantidad de energía, que pudo percibirse en su cara sudoriental. La detección corrió a cargo de dos cámaras infrarrojas instaladas en los telescopios Carlos Sánchez (TCS), de 1,54 metros del Observatorio del Teide (Tenerife,) y NOT (Telescopio Optico Nórdico), de 2,56 m del Observatorio del Roque de los Muchachos (La Palma). Simultáneamente, el observatorio almeriense de Calar Alto, que operaba con instrumental de similares características, confirmaba la detección.

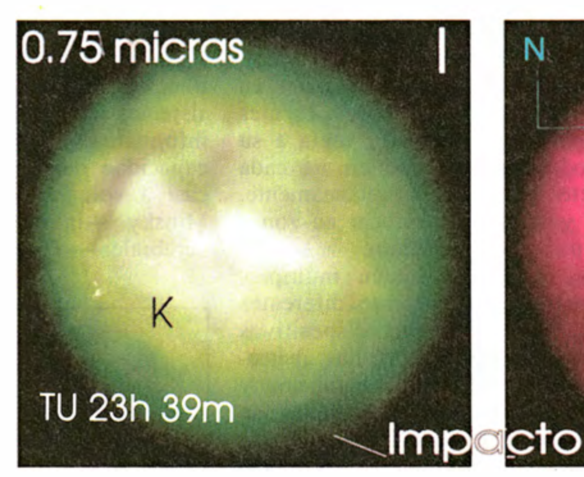
Los astrónomos de Tenerife exultaban de alegría. Con todo derecho: la cámara instalada en el TCS se había diseñado y construido por entero en el Instituto de Astrofísica de Canarias. El equipo hispano-francés que trabajaba en el NOT tampoco disimulaba su satisfacción. Pocas horas después llegaba la confirmación óptica del impacto desde el telescopio IAC80 del Observatorio del Teide, con la detección de una estructura oval sobre la superficie. Las imágenes difundidas luego por el *Telescopio Espacial Hubble* (HST) no dejaban lugar a dudas: el fragmento A había provocado una explosión tremenda sobre la superficie de Júpiter, cuya traza, contrastada sobre el limbo del planeta, recordaba la estampa del hongo atómico.

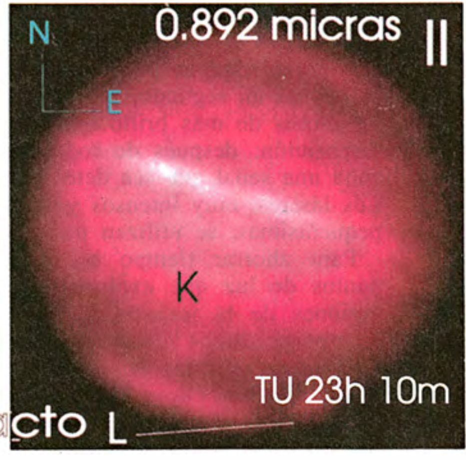
En los días siguientes —17, 18 y 19 de julio— se precipitaron otros fragmentos contra la atmósfera joviana. Provocaron explosiones de diverso calibre, detectables en radiación infrarroja, que dejaban trazas visibles en el óptico sobre la superficie del planeta. Un hecho nos llamó poderosamente la atención. Desde nuestros telescopios, habíamos detectado los impactos de los fragmentos A, E, y H. Contábamos, además, con información contrastable de otros observatorios. Parecía evidente que no existía una relación directa entre el brillo óptico de los fragmentos antes del impacto y el flujo infrarrojo que estábamos detectando una vez producido éste. Así, aunque el brillo del fragmento H hubiera multiplicado varias veces el de A, los efectos de sus impactos respectivos fueron de similar magnitud.

Por eso, no nos sorprendió demasiado el espectáculo de la noche del día 19, en contraste con la decepción manifiesta de muchos profesionales en el atardecer del día 20. Para este día, se esperaba el impacto del fragmento Q, el más brillante de cuantos habían integrado el Shoemaker-Levy 9. Sin embargo, lo observado no tuvo nada que ver con lo que habíamos apreciado la noche anterior —la del 19— desde los observatorios canarios.

Esa noche se esperaba el impacto del fragmento L, el quinto por orden de brillo, que, junto con el K, había ocupado más o menos el centro geométrico del rosario de perlas que constituía el cometa en el instante de su descubrimiento. El impacto del fragmento K, intensísimo, dejaba ver los efectos de la explosión sobre el disco de Júpiter a las 22:18 T.U., cuando una doble explosión era observada desde el TCS en el limbo del planeta, a la longitud de onda del infrarrojo medio —2,16 micras. Unos seis minutos después, el doble impacto era percibido con nitidez por el equipo hispano-francés del NOT, esta vez en el infrarrojo lejano —10 micras. El flujo de energía fue tal, que en el instante del máximo, ocurrido hacia la 22:31 T.U., superaba la emisión global de todo el planeta en esas longitudes de onda.

Una hora después de su detección en infrarrojo, una gran estructura, ligeramente mayor que la Mancha Roja (mayor, por tanto, que la Tierra), aparecía en el óptico. Las trazas del impacto L persistieron sobre la superficie con un brillo superior a la de todas las explosiones anteriores.





Impacto con Júpiter del fragmento L del cometa Shoemaker-Levy 9. Imágenes tomadas desde los telescopios instalados en las islas Canarias la noche del 19 de julio de 1994. La imagen I y II corresponde a imágenes obtenidas en el visible (rojo) e infrarrojo cercano (filtro centrado en una linea espectral de gas metano), respectivamente, desde el telescopio IAC80 del Observatorio del Teide, alrededor de una hora después de la detección de la explosión en otras longitudes de onda. Se distinguen las estructuras asociadas a los impactos de los fragmentos K y L. La imagen III corresponde al máximo de emisión detectado en infrarrojo

Por otra parte, las imágenes obtenidas por el HST permiten abordar el comportamiento de la atmósfera del planeta: las estructuras remanentes de los impactos experimentan variaciones, con presencia de plumas que, en espiral, se mueven hacia el polo Sur de Júpiter. Los fragmentos R y S fueron los últimos en dejar rasto evidente de su colisión planetaria.

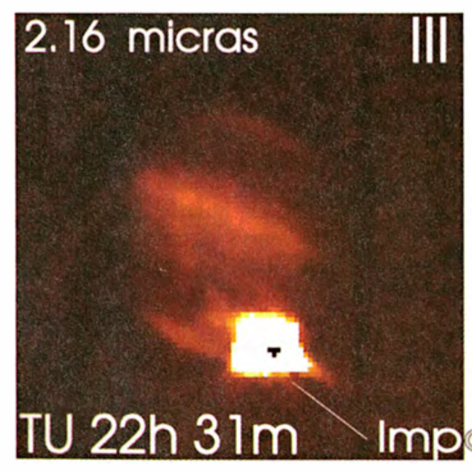
Ha terminado el espectáculo astronómico, pero todavía podemos contemplar sus secuelas físicas sobre el disco de Júpiter, donde un rosario de estructuras corrota con el planeta a unos 60 grados de latitud sur. Más perdurables serán sus secuelas científicas. Ha comenzado una batalla para explicar el por qué fragmentos, en teoría pequeños —poco brillantes—, dieron lugar a emisiones de energía muchísimo mayores que otros "mayores" —de mayor brillo.

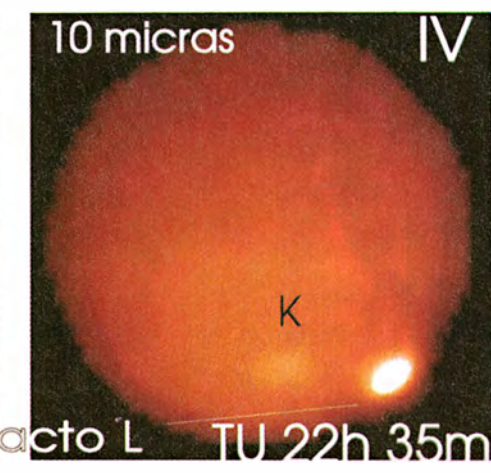
Por un lado están los partidarios de unos núcleos más densos, masivos y compactos, que se habrían evaporado menos y serían, por tanto, menos brillantes en el óptico; esto explicaría que los fragmentos centrales del rosario, K y L, poco brillantes, produjesen explosiones más impresionantes que, por ejemplo, el Q2, de luminosidad mayor. Por otro lado están los partidarios de una relación clara entre brillo, tamaño y masa; postulan la posibilidad de que los núcleos masivos explotasen en regiones mucho más internas (y opacas) del planeta, por lo que el efecto directo del impacto habría sido menor. No podemos todavía dirimir quién tiene razón.

A corto o medio plazo, el enorme caudal de información acumulada en todo el espectro electromagnético, tanto a nivel fotométrico como espectroscópico, habrá de facilitar las respuestas que hoy se plantean. El ingente flujo de imágenes nos desvelará la estructura, composición y dinámica de la atmósfera joviana. Igualmente, las series muy largas de datos fotométricos recogidos en el Observatorio Europeo del Sur, en el de Mauna Kea y en nuestros telescopios, nos permitirán realizar estudios sismológicos para así acceder, a través del espectro de modos propios de oscilación del planeta, hasta su interior profundo y conocer su estructura y composición internas. Finalmente, los expertos en cometas esperan adentrarse en la composición química de estos objetos, a través del estudio del comportamiento de los fragmentos y de las secuelas provocadas en la atmósfera del planeta.

La enorme fuerza gravitatoria de Júpiter es capaz de atrapar, cada 10.000 años, un cometa en una órbita cerrada a su alrededor, fragmentarlo y provocar su caída sobre el gigante gaseoso. Los astrónomos de finales del siglo XX podemos sentirnos satisfechos de haber tenido la suerte de ser los primeros en observar un evento de este tipo y, sobre todo, de disponer de la instrumentación para estudiarlo, cuantitativa y cualitativamente, de forma adecuada.

JUAN ANTONIO BELMONTE
Y TEODORO ROCA CORTÉS
Instituto de Astrofísica de Canarias





medio (2,16 micras), desde el telescopio Carlos Sánchez. Los puntos negros son secciones saturadas del detector (la cámara IR), debido a la enorme intensidad de la explosión. La imagen IV, obtenida con CAMIRAS, corresponde al máximo observado en infrarrojo lejano (10 micras), desde el Telescopio Optico Nórdico. Se pueden apreciar la estructura brillante creada por el fragmento K, así como la gran burbuja de material altamente emisor recién producida por el impacto del fragmento L sobre la atmósfera joviana. El flujo de emisión en 10 micras permaneció casi constante y muy intenso durante varias horas después del choque.

Medalla Fields

Para jóvenes matemáticos

Desde 1936 y con periodicidad cuatrienal, la medalla Fields se concede a matemáticos de menos de 40 años, en el marco del Congreso Internacional de Matemáticos.

JEAN BOURGAIN

Los matemáticos se subdividen en dos categorías: los que edifican teorías y los que resuelven problemas, los que elaboran generalizaciones de teorías existentes, que servirán de marco al trabajo de otros, y los que atacan, con los medios disponibles a bordo, los problemas no resueltos. Alexander Grothendieck y Stephen Smale son miembros prestigiosos del primer conjunto, el de los constructores de arsenales; Jean Bourgain pertenece a la segunda categoría: "Aprecio poco las generalizaciones de las que nadie sabe si algún día tendrán interés", afirma. "La exagerada tendencia generalizadora de hace quince años está un poco pasada de moda. Mi vanidad personal me incita a atacar problemas que los demás no saben resolver; ésa es mi manera de contribuir al progreso de las matemáticas."

De adolescente, Jean Bourgain quedó seducido por la geometría. Las propiedades de la geometría proyectiva, los teoremas de Brianchon y Pascal sobre los hexágonos ejercieron una fascinación cierta sobre su joven cerebro. En la geometría, la teoría es poco importante y las aplicaciones, numerosas. "Me encantaban los problemas de geometría; para tener éxito es necesario demostrar creatividad. En la enseñanza que recibí en Bélgica se ponían a prueba nuestras aptitudes para la resolución de problemas. Tengo la impresión de que en Francia (y en España) la selección está más fundada en la capacidad de asimilación de conocimientos", se lamenta. A los 16 años, Jean Bourgain redescubre las fórmulas que proporcionan las soluciones de las ecuaciones de tercer y cuarto grado. Algunos matemáticos pueden contar en su activo esta pequeña proeza técnica: se numeran entre los mejores...

En la Universidad de Bruselas, los cursos de análisis están estructurados en fase con la dinámica de las matemáticas. El campo del análisis despierta su interés, los cursos son de gran calidad y, en el último curso de licenciatura, hacia los 20 años, Bourgain demuestra un teorema que tendrá resonancia internacional. Su trayectoria iniciática de estudiante y de investigador después es natural: de las propiedades de las series de Fourier al análisis armónico, para seguir luego con los sistemas dinámicos. Es raro que un matemático salte de un dominio a otro situado en las antípodas del corpus matemático; es más frecuente y más eficaz que trate de aprovechar en campos vecinos las técnicas adquiridas o que él mismo ha desarrollado.

Los conjuntos L_p estudiados por Jean Bourgain desempeñan en análisis un papel importante. Tomemos una función f de la variable t, y descompongámosla en suma de exponenciales del tipo $a_n e^{int}$. La norma L_2 de Hilbert de una función f de este tipo es igual a la raíz cuadrada de la integral entre 0 y 2π del cuadrado de la función. ¿Cuáles son los conjuntos de frecuencia n para los que se verifica la equivalencia de la norma hilbertiana L_2 y de la norma L_p, es decir, de la raíz p-ésima de la integral de la potencia p-ésima de la función f? (Se dice que dos normas son equivalentes cuando cada una está limitada superior e inferiormente por múltiplos de la otra.) Estas estructuras aparecen en diversos problemas; por ejemplo, en el estudio de soluciones periódicas de la ecuación de Schrödinger, que es base de la mecánica cuántica.

Un problema pendiente desde hace mucho concernía a la existencia de verdaderos conjuntos "L_p" para todos los valores de p mayores que 2. ¿Cómo obtener las funciones L_p definidas por una sucesión de valores de n? Los casos en los que los valores de p son pares y mayores que 2 habían sido resueltos mediante condiciones explícitas, pero no así en el caso de los valores impares de p. Jean Bourgain ha resuelto el problema para todos los valores de p por medio de argumentos probabilísticos. A cada entero n le asocia una probabilidad de eliminación de este elemento, la cual depende de n y de p. Resulta una sucesión aleatoria en la cual la función correspondiente es casi seguro que posea la propiedad L_p.

Según Jean Bourgain, parece que la determinación de fórmulas explícitas y determinísticas de las funciones pertenecientes a L_p en el caso de ser p mayor que 2 no está al alcance de los conocimientos matemáticos actuales, mientras que el útil probabilístico posee estructuras bien compatibles con la naturaleza del problema.

Los conjuntos L_p aparecen en análisis en la resolución de la ecuación de Schrödinger no lineal y son útiles en el estudio del comportamiento de las soluciones de ecuaciones diferenciales cuando las condiciones iniciales son poco regulares, por ejemplo, trayectorias brownianas. Estas curvas, de naturaleza patológica, son continuas (podemos dibujarlas sin levantar el lápiz del papel), pero no poseen derivada en ningún punto. Para imaginar su naturaleza, pensemos en las fractales.

Estos trabajos guardan relación con la teoría de números; en especial con las series de Dirichlet y con ciertas conjeturas concernientes a su distribución. Los resultados del nuevo medallista Fields tienen también impacto en los sistemas dinámicos, como por ejemplo en el siguiente problema asociado a la teoría ergódica, es decir, a las propiedades evolutivas de un sistema físico. Supongamos que se miden las características de la evolución de una mezcla. Podemos medir a intervalos regulares las concentraciones de los diversos

Jean Bourgain

ingredientes. Jean Bourgain ha demostrado que dicha medida puede efectuarse a intervalos de tiempo espaciados como la sucesión de los cuadrados; por ejemplo, al cabo de 1, 4, 9, 16, 25... segundos, o de acuerdo con sucesiones más generales todavía.

En vencer la dificultad tiene su recompensa el matemático. "Experimento una emoción cuando sé que he encontrado la clave para la resolución de un problema. Mi satisfacción es tanto mayor cuanto más prolongado ha sido el esfuerzo. Sin embargo, la valoración de la comunidad matemática es diferente. Los colegas se interesan más por lo que les resulta inmediatamente accesible", comenta Jean Bourgain.

Una leyenda alemana confiere a Federico Barbarroja, muerto en cruzada, la posibilidad de renacer en Alemania. Hilbert, a quien se le preguntó qué haría si también él pudiera renacer al cabo de algunos siglos, había respondido "¡Preguntaría si había sido demostrada la conjetura de Riemann!" La serie de Riemann es igual a la suma de los inversos de los números enteros elevados a la potencia s; la conjetura de Riemann se refiere a la parte real de los valores de s para los cuales se anula la función definida por la serie; concierne, pues, a la parte real de los ceros de la función. Hasta la fecha, todos los ceros de la función que han sido calculados tienen parte real igual a 1/2, pero esta peculiaridad está por demostrar. Jean Bourgain tiene el mismo deseo que Hilbert: "No creo, sin embargo, que la conjetura de Riemann vaya a ser demostrada en un futuro cercano, porque carecemos de un programa para atacar el problema, similar al esbozado para la conjetura de Fermat. ¿Podrá quedar resuelta la conjetura gracias a una astucia individual? Lo pongo en duda. Lo que me interesaría no sería tanto el resultado, al que tengo por cierto, como los métodos que serían utilizados para su demostración."

Jean Bourgain es profesor del Instituto de Altos Estudios Científicos, en Bures-sur-Yvette, pero está destinado en el Instituto de Estudios Avanzados de Princeton. No tiene alumnos ni ejerce docencia. Su vida es una constante búsqueda del tiempo necesario para hacer matemáticas. Trabaja solo, con frecuencia por la noche. Menos que cuando era soltero, porque la creación de una familia le obliga a madrugar más. "Para que un matemático tenga éxito hay que dejarle trabajar solo durante un periodo indeterminado."

Pierre-Louis Lions

Hace mucho que los matemáticos conocen a Jean-Louis Lions, que desarrolló la gran escuela francesa de matemáticas aplicadas. Al cabo de una quincena de años, descubren ahora que J. L. Lions tiene un hijo llamado Pierre-Louis que no le desmerece en nada. Nacido en 1956, Pierre-Louis ingresó en la Escuela Normal Superior en 1975; fue nombrado profesor de la Universidad París Dauphine en 1981. Promovido ocho años después a la clase excepcional, ha recibido numerosos galardones, entre ellos, el premio IBM en 1987 y el premio Philip Morris en 1991. Ahora, con la medalla Fields, el hijo accede a un honor jamás alcanzado por su padre.

Padre e hijo se desenvuelven en un mismo ambiente. Tienen las mismas preocupaciones, se relacionan con las mismas personas y estudian matemáticamente las ecuaciones de la física, con la esperanza de que la demostración rigurosa de teoremas y la obtención de resultados sólidamente establecidos, "matemáticamente impecables", facilitará el progreso a los físicos, los químicos y a los ingenieros, o más simplemente, les permitirá utilizar métodos fiables de cálculo numérico.

Las palabras clave del trabajo de Pierre-Louis Lions son física matemática y matemáticas aplicadas. En mecánica de fluidos, en termodinámica de gases, en la física de plasmas, en mecánica cuántica, en óptica o en matemáticas financieras, los especialistas establecen ecuaciones en las que intervienen tasas de variación: la tasa de variación de la posición de una partícula en función del tiempo (la velocidad), la tasa de variación de la velocidad (la aceleración), la tasa de variación del campo eléctrico en función del punto del espacio, la tasa de variación de la energía potencial en función de la distancia entre dos partículas... El objetivo consiste en hallar las soluciones de estas "ecuaciones en derivadas parciales" o, cuando menos, determinar ciertas propiedades de las soluciones, con el propósito de determinar después métodos numéricos seguros para calcular soluciones particulares de las ecuaciones.



Pierre-Louis Lions

Pierre-Louis Lions ha obtenido sus más notables resultados en física de fluidos. Los fluidos considerados por los físicos son conjuntos de partículas que se propagan, chocan entre sí y a veces interactúan a distancia (por ejemplo, a causa de fuerzas eléctricas). Desde el punto de vista de los fundamentos, la única ecuación necesaria para la descripción de un fluido es la ecuación fundamental de la dinámica de Newton, que relaciona la fuerza que actúa sobre cada partícula con la aceleración que ésta experimenta. Sin embargo, el número de partículas de un fluido es tan considerable, que resulta imposible resolver el sistema de ecuaciones constituido por esta relación al formularla para cada una de las partículas del fluido.

Los físicos han buscado en consecuencia descripciones más macroscópicas, valiéndose sobre todo de una función introducida por el físico alemán Ludwig Boltzmann (1844-1906): la función densidad indica el número probable de partículas que poseen una posición y una velocidad particulares. Esta función verifica una ecuación en derivadas parciales, la denominada ecuación de Boltzmann; ocupa una posición intermedia entre las ecuaciones de la dinámica, que corresponden al nivel molecular, y las ecuaciones de Navier-Stokes, que describen los flujos macroscópicos.

El programa de Boltzmann consiste en la resolución de estas ecuaciones y en la demostración impecable de las aproximaciones utilizadas por los físicos. La existencia de ondas de choque introduce dificultades en este programa. Tales ondas, descritas por otra ecuación, la ecuación de Euler,

que corresponde a la ecuación de Navier-Stokes sin el término asociado a la viscosidad, contaminan el problema y obligan a utilizar distribuciones en lugar de funciones.

Las distribuciones fueron estudiadas en el decenio de 1940 por el matemático francés Laurent Schwartz, quien recibió por este trabajo la medalla Fields. La noción de distribución había sido intuida ya por Bernhard Riemann, en el segundo tercio del siglo pasado, precisamente al respecto de las ondas de choque. Por ejemplo, para describir las variaciones de presión en una onda de choque se puede utilizar la función de Heaviside, que es nula hasta el punto de abscisa igual a 0, e igual a 1 a partir de ahí. La función de Heaviside no es derivable en el punto de abscisa nula (pues es discontinua en él), por lo que no tiene derivada en sentido clásico; en cambio, sí es derivable como distribución. Las ecuaciones en las que pueden hallarse soluciones expresables mediante distribuciones se llaman resolubles en sentido débil.

El trabajo más notable de Pierre-Louis Lions ha sido efectuado en colaboración con Ron DiPerna, matemático de la Universidad Duke fallecido hace poco. Juntos demostraron que el modelo de Boltzmann para los gases enrarecidos es matemáticamente correcto y que posee soluciones débiles. Este resultado es esencial para estudiar la fiabilidad de las simulaciones numéricas en aerodinámica (las naves espaciales se desplazan en un medio de este tipo), en metalurgia, en astrofísica o en física de semiconductores.

Este resultado, obtenido para la ecuación de Boltzmann, es de la misma naturaleza y de igual dificultad que el obtenido hace medio siglo por Jean Leray a propósito de la ecuación de Navier-Stokes. Cierto día que salía de la Academia de Ciencias, J. Leray observó el fluir del Sena en torno a un pilar de un puente. El flujo, regular, parecía demostrar la existencia de soluciones regulares para la ecuación de Navier-Stokes; pero, en ocasiones, el agua se volvía bruscamente turbulenta en pequeñas zonas, y un choque local disipaba gran cantidad de energía, para retornar después al flujo regular.

En el caso de un líquido que llenase un espacio infinito, sin paredes, Leray procedió a buscar las soluciones modificando uno de los términos de manera que no se perturbase la disipación de energía, demostró la existencia de soluciones de la nueva ecuación e hizo ver después cómo se modificaban tales soluciones cuando la perturbación se hacía tender a cero. Pierre-Louis Lions ha procedido de distinta manera, introduciendo para ello varias técnicas nuevas. Una de ellas, obtenida en colaboración con M. Goltse, Benoit Perhame y M. Sentis, consiste en tomar las medias de las velocidades.

El trabajo de Pierre-Louis Lions es aplicable también a numerosas ecuaciones en derivadas parciales, como la ecuación de Liouville, que describe la evolución de un gas de partículas cargadas eléctricamente en el seno de un campo electromagnético externo, la ecuación de Vlasov, que describe los gases en los que la densidad de partículas no permite despreciar sus interacciones mutuas y que sirve, sobre todo, para describir las oscilaciones electrostáticas longitudinales en los plasmas; el sistema BBGKY (Born-Boglioubov-Green-Kirkwood-Yvon), la ecuación de Maxwell, etc. El programa de Boltzmann no está concluido, pero las perspectivas de progreso son muy buenas.

Por último, Pierre-Louis Lions, individualmente o en colaboración, ha abordado y resuelto muchos otros problemas de ecuaciones en derivadas parciales, entre ellos, el estudio de las ecuaciones de Hamilton-Jacobi, con la que se tropiezan los especialistas en mecánica; la puesta a punto del método de compacidad por compensación para demostrar las propiedades de estabilidad molecular, que tiene aplicaciones a la modelización matemática de fenómenos químicos, y la utilización de ecuaciones elípticas no lineales en el tratamiento de imágenes.

Pierre-Louis es un trabajador vigoroso, muy organizado, que ha compartimentado su tiempo para profundizar simultáneamente en sus varios centros de interés sin descuidar la marcha de su equipo, con sus numerosos discípulos. Algunos estudian materias de aplicación más directa que las ecuaciones en derivadas parciales, como matemáticas financieras, o se dedican a la investigación de los fundamentos axiomáticos del tratamiento de imágenes o sonidos.

En el Congreso de Zurich su conferencia estuvo consagrada a "algunos métodos recientes para las ecuaciones no lineales en derivadas parciales." Según Claude Bardos, la comisión Fields ha laureado en este caso tanto la potencia de los resultados como la tendencia, plenamente actual, consistente en crear matemáticas nuevas a partir de problemas físicos, en lugar de formalizar y generalizar las matemáticas ya existentes, tarea en que se ocuparon muchos de los matemáticos de comienzos de siglo.

Jean-Christophe Yoccoz

Jean-Christophe Yoccoz nunca pensó en otra cosa que en ser matemático. Era excelente en esta disciplina durante sus estudios primarios y secundarios en Estrasburgo, Grenoble y París, lugares donde su padre, físico, trabajó sucesivamente. En 1979, al terminar en la Escuela Normal Superior, se lanzó al estudio de los sistemas dinámicos bajo la dirección de Michel Herman, en la Escuela Politécnica. Tuvo después que irse a cumplir su servicio militar en cooperación, al IMPA, el centro matemático de Río de Janeiro, una de cuyas grandes especialidades son los sistemas dinámicos, que mantiene desde hace treinta años estrechos lazos con la escuela francesa de matemáticas. De regreso a Francia, fue nombrado profesor de la Universidad de Orsay en 1988, a la edad de 31 años. Allí continuó los estudios que hoy le han merecido la coronación.

¿Qué es un sistema dinámico? El ejemplo del Sol y los planetas preocupa a los matemáticos desde hace mucho tiempo, quienes tratan de determinar las trayectorias de todos estos cuerpos a partir de la expresión de las fuerzas gravitatorias y de las posiciones y velocidades iniciales de cada cuerpo. Henri Poincaré, a principios de siglo, fue el gran nombre de esta disciplina a la que se han ido progresivamente arrimando problemas menos insolubles, como las transformaciones del círculo.

Localicemos los puntos de un círculo por la distancia angular que los separa de uno de ellos, que se toma como origen. Se llaman transformaciones simples a las que consisten en desplazamientos de un punto a otro mediante saltos de valor constante. Tales transformaciones consisten en giros, cuyo ángulo determina la repartición de los puntos que se van obteniendo sucesivamente. Si el ángulo de giro es producto de multiplicar 2π por un número racional, la iteración de la transformación acaba devolviéndonos al punto de partida tras cierto número de vueltas; dichas transformaciones son periódicas. Por el contrario, si el ángulo es producto de 2π por un número irracional, ningún punto retorna jamás a un punto visitado con anterioridad, pero, al cabo de cierto número de vueltas, muchas posiblemente, los puntos se acercan tanto como uno quiera al punto inicial. El comportamiento es cuasi-periódico.

¿De qué forma se distribuyen sobre el círculo los puntos obtenidos por transformaciones que no sean de ro-

tación? He aquí una de la grandes cuestiones que han examinado los especialistas en sistemas dinámicos. En el caso general se estudian las órbitas, esto es, los conjuntos formados por un punto inicial del círculo más los obtenidos por aplicación reiterada de la transformación a partir de ese punto inicial. Las transformaciones de Arnold (debidas a Vladimir Arnold, actualmente en la Universidad París Dauphine y en Moscú) constituyen ejemplos de transformaciones regulares bien estudiadas; el n-ésimo punto, situado a la distancia x_n del punto inicial, se obtiene a partir del precedente aplicando la ley: $x_{n+1} = x_n + 2\pi a + \varepsilon \operatorname{sen}(x_n)$.

En el caso del círculo, el comportamiento de las transformaciones fue inicialmente estudiado por Poincaré, quien consideraba transformaciones llamadas difeomorfismos, que son crecientes, invertibles y suficientemente regulares, como lo son las transformaciones de Arnold. Poincaré había introducido la noción de "número de rotación". Para una transformación cualquiera, o bien existe un punto del círculo que vuelve sobre sí mismo al cabo de cierto número de iteraciones de la transformación (órbita periódica), o bien existe un número irracional tal, que el orden de los puntos de cualquier órbita de la transformación es también el orden del giro de ángulo igual al número irracional. Por ejemplo, si en una órbita el 17-ésimo punto de la transformación se encuentra entre los puntos 42-ésimo y 33-ésimo de esa misma órbita, entonces el número de rotación es el ángulo irracional del giro tal que el 17-ésimo punto de ese giro se encuentre asimismo entre los 42-ésimo y 33-ésimo correspondientes al giro.

Poincaré había observado que, en el caso de las transformaciones de Arnold y de los otros difeomorfismos, los puntos de todas las órbitas se reparten de igual manera sobre el círculo: al elegir un intervalo del círculo, la proporción de los puntos de la órbita que se encuentran en ese intervalo (lo que se llama su medida) es idéntica para todas las órbitas. Posteriormente, hacia 1930, M. Denjoy había contribuido al estudio del problema demostrando que, si la transformación es suficientemente regular, dicha medida no es nula en ningún intervalo. Subsistía empero el problema de la comprensión detallada de las propiedades estáticas de las órbitas, de determinar la medida en función del intervalo. ¿Habrá ciertas regiones del círculo que contengan más puntos orbitales que otras? La proporción de puntos de la órbita en un intervalo, ¿es proporcional a la longitud del intervalo, incluso cuando éste se hace infinitamente pequeño? Se dice en tal caso que la transformación posee función de densidad.

El propio Poincaré había observado que la respuesta a esta última pregunta dependía del modo en que el número de giro, irracional, fuese aproximado por números racionales, o sea, por fracciones. Un número irracional no es una fracción, pero puede ser aproximado por una fracción, y cuanto mayor sea el denominador de ésta, mejor puede ser la aproximación. Así, por ejemplo, el número π va siendo aproximado cada vez más de cerca por las siguientes fracciones, de denominador creciente: 3/1, 22/7, 333/106, 355/113...

Quedaba por comprender la forma en que las buenas aproximaciones racionales del número de rotación repercuten en las propiedades de repartición de las órbitas. Para tales estudios, los especialistas en sistemas dinámicos podían aprovecharse de los numerosos resultados concernientes a las fracciones continuas, que proporcionan las mejores aproximaciones de los números irracionales. Por ejemplo, $\sqrt{2}$ es igual a la fracción continua $1 + 1/(2 + 1/(2 + 1/(2 + 1/(2 + 1...))))$. Al detener el desarrollo en el primer denominador, en el segundo, en el tercero... se va obteniendo una sucesión de fracciones que se aproximan cada vez mejor a $\sqrt{2}$; el error $a\text{-}p/q$ es del orden de $1/q^2$ (en este caso, la aproximación de $\sqrt{2}$ por la fracción continua es mediocre).

Volvamos a la cuestión. Se considera el conjunto de transformaciones analíticas, como las transformaciones de Arnold, que poseen un número de rotación dado y se buscan propiedades comunes a todas las medidas de estas transformaciones. A comienzos del decenio de 1960, V. Arnold y Jürgen Moser habían demostrado que, si el número ε es pequeño, se obtiene siempre una densidad cuando el número de rotación es mal aproximado por racionales; por el contrario, cuando tal aproximación es demasiado buena no siempre se obtiene una densidad. En 1976, M. Herman hizo avanzar decisivamente la cuestión al suprimir la restricción sobre el número ε. El caso de los números intermedios, los que no son ni muy bien ni muy mal aproximados, permanecía abierto.

En 1989, Jean-Christophe Yoccoz llenó la laguna de los números intermedios, al determinar exactamente cuáles son los números de rotación que, en el caso de transformaciones analíticas, poseen una densidad analítica. Yoccoz se interesó por las transformaciones analíticas porque estas transformaciones se extienden a las vecindades del círculo; no se limitan a asociar un punto del círculo a cada punto del círculo, sino que, más generalmente, le asocian un punto del plano a cada punto del plano que



Jean-Christophe Yoccoz

esté suficientemente cerca del círculo. En este caso, la densidad es analítica si los puntos suficientemente cercanos al círculo no escapan al iterar la transformación. En el caso más sencillo, en el que la fracción continua $a_0 + 1/(a_1 + ...)$ del número de giro es tal que a_n es menor que a_{n+1} y éste es además menor que $\exp(a_n)$, se compara el coeficiente a_n con e elevado a e elevado a e... iterado m veces (el número m depende de n). Para números de rotación como éstos, existe siempre una densidad analítica si y solamente si $n-m$ tiende a infinito.

Este trabajo se ocupa del círculo. Mucho peor se conocen los sistemas dinámicos en dimensiones superiores. Jean-Christophe Yoccoz los estudia con Jacob Palis, del IMPA. ¿En pos de qué griales matemáticos corre Yoccoz? He aquí dos: ¿es posible perturbar una transformación cualquiera del toro, que carezca de puntos periódicos, de forma que se cree una órbita periódica? ¿Cuáles son, en varias dimensiones, las análogas de las fracciones continuas? Jean-Christophe Yoccoz confiesa haber dedicado tiempo a estos problemas, sin resultados satisfactorios por el momento.

Invitado al congreso mundial de matemáticos, pronunció allí una conferencia plenaria y recibió la medalla Fields, lo que, desde hace varios años, se presentía. Se siente muy feliz de compartirla con otros dos matemáticos de la escuela francesa: "Tras la dispersión de la escuela de Moscú, París se ha convertido en el mayor centro matemático del mundo..."

EFIM ZELMANOV

A los 38 años, Efim Zelmanov es un especialista del álgebra. Cursó sus estudios en Novosibirsk, en Siberia occidental, donde después ha realizado lo esencial de su carrera. Desde 1990 trabaja en los Estados Unidos. Tras enseñar en la Universidad de Madison, ha sido contratado por la de Chicago.

Zelmanov ganó celebridad en 1989 por haber explorado el problema de Burnside, planteado en 1902. Concierne este problema a la estructura de grupo. Tenemos un ejemplo de tal estructura en el grupo de giros alrededor de un punto, en el plano. Al encadenar dos giros de ángulos respectivos a y b resulta nuevamente un giro de ángulo $a + b$. Se dice que la ley de encadenamiento (o "de composición") de giros es una "ley interna", puesto que da por resultado un elemento del conjunto. Esta ley es, además, asociativa: al componer



Efim Zelmanov

un giro de ángulo c tras la composición de giros de ángulos a y b resulta el mismo giro que la composición del giro a con el resultado de componer los ángulos b y c. La ley posee un elemento neutro, a saber, el giro de ángulo nulo, pues al componer este giro con cualquier otro, el segundo queda invariable. Y cada elemento del conjunto posee un elemento simétrico: el giro de ángulo $-a$, compuesto con el de ángulo a, produce el elemento neutro, esto es, el giro de ángulo nulo.

El problema de Burnside se refiere a los grupos que son engendrados por un número dado de elementos "generadores", por ejemplo, a, b, c, tales que cada elemento compuesto consigo mismo un número dado de veces, cuatro, sea por por caso, resulte igual a uno de los elementos del grupo, el a, por ejemplo ($a.a.a.a = a$, $b.b.b.b = a$ y también $c.c.c.c = a$). La cuestión de Burnside consiste en saber si el grupo así generado a partir de a, b, c posee un número finito de elementos. El problema se plantea, con mayor generalidad, para un número n de elementos generadores, con la propiedad de que, al componer m veces consigo mismo cada uno de los generadores, resulte siempre uno y uno mismo de los generadores.

Efim Zelmanov ha hecho avanzar considerablemente la cuestión al introducir una cantidad notable de técnicas nuevas aplicables en numerosos dominios de estas matemáticas.

De cerca

Fotos y texto: Kōji Nakamura

Convivencia letal





Sabemos que la caza fue una de las primeras actividades del hombre. Pero instintivamente pensamos en venados y gacelas. La verdad es que, muchas veces, parte importante del sustento lo constituían los moluscos, cuyas conchas hallan amontonadas los paleontólogos en recodos de los abrigos paleolíticos. Aprovecháronse éstas más tarde como moneda de intercambio. Y hasta los gabinetes de historia natural se dispusieron de suerte que las colecciones malacológicas atrajeran la mirada placentera del dueño y los visitantes.

En los museos vivos de los mares tropicales reinan cipreidos y ovúlidos, pertenecientes a una misma familia. El manto recubre la concha, de cromatismo rutilante, que sólo aparece si el animal se siente en peligro. Son moluscos dotados de un largo sifón inhalante anterior y carentes de opérculo, rádula firme y potente diente central. Suelen presentar dimorfismo sexual.

Conviven asociados, en el epibentos, con corales, gorgonias y alcionarios. El cipreideo de la izquierda no avanza pacíficamente por el coral. Se está alimentando del animal sésil que le da cobijo. Hasta donde puede llegar el ataque nos lo muestra la fotografía de la derecha: un ovúlido ha terminado con la epidermis y deja sus huevos en el esqueleto del celentéreo.

FOTO SUPERIOR
distancia focal: 55 mm
diafragma: F = 8
exposición: 1/80 de segundo
película: JIS = 25

FOTO INFERIOR
distancia focal: 55 mm
diafragma: F = 8
exposición: 1/80 de segundo
película: JIS = 25

FOTO DE LA DERECHA
distancia focal: 60 mm
diafragma: F = 11
exposición: 1/80 de segundo
película: JIS = 25



Superconductores de interferencia cuántica

Estos dispositivos constituyen los detectores de campos magnéticos más sensibles que hay. Sus aplicaciones van del diagnóstico de tumores cerebrales a la contrastación de la relatividad

John Clarke

Una batería de detectores dispuesta en torno a la cabeza de un paciente con epilepsia focal capta mínimas fluctuaciones del campo magnético y señala con precisión dónde se halla la lesión a la que se debe el trastorno. Una barra de aluminio de cinco toneladas suspendida en una cámara de vacío a una temperatura próxima al cero absoluto espera la minúscula perturbación que indicaría la llegada de una onda de gravedad procedente de una supernova. Un solitario instrumento instalado en Baja California registra sutiles variaciones del campo magnético, para que los geofísicos localicen en el subsuelo una fuente potencial de energía geotérmica.

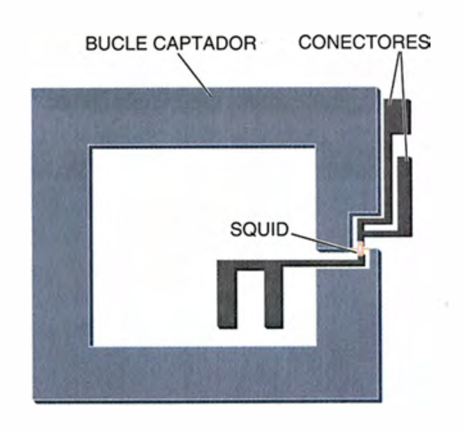
Mediciones tan dispares son posibles gracias al llamado SQUID, acrónimo —que coincide con la palabra que en inglés significa calamar— de *superconducting quantum interference device*, dispositivo superconductor de interferencia cuántica. El SQUID, que capta cambios del campo magnético, es el detector más sensible de que se dispone. No conoce mayor limitación que la que le imponen efectos cuánticos inherentes. Se ha convertido en el dispositivo superconductor de pequeña escala más usado. Sin ser invento reciente —en 1993 cumplió treinta años—, su acceso acaba de experimentar una auténtica revolución. El advenimiento de los superconductores de alta temperatura a finales de los ochenta ha permitido que los SQUID operen en nitrógeno líquido a unos 77 kelvin (–196 grados C). Los nuevos SQUID hallarán una aplicación más directa, generalizada y sencilla que los construidos a partir de los superconductores corrientes, que funcionan sólo a temperaturas cercanas al cero absoluto.

Las propiedades del SQUID derivan de la combinación de varios efectos mecanocuánticos. El flujo sin resistencia de la corriente eléctrica es el más obvio. Heike Kamerlingh Onnes ganó el premio Nobel por haber descubierto en 1911 que el mercurio se vuelve superconductor cuando se lo enfría con helio líquido a 4,2 kelvin. Luego se mostró que muchos metales —el estaño, el plomo y el niobio,por ejemplo— y un gran número de aleaciones pierden toda resistencia al paso de la corriente cuando se los enfría a temperaturas bajas.

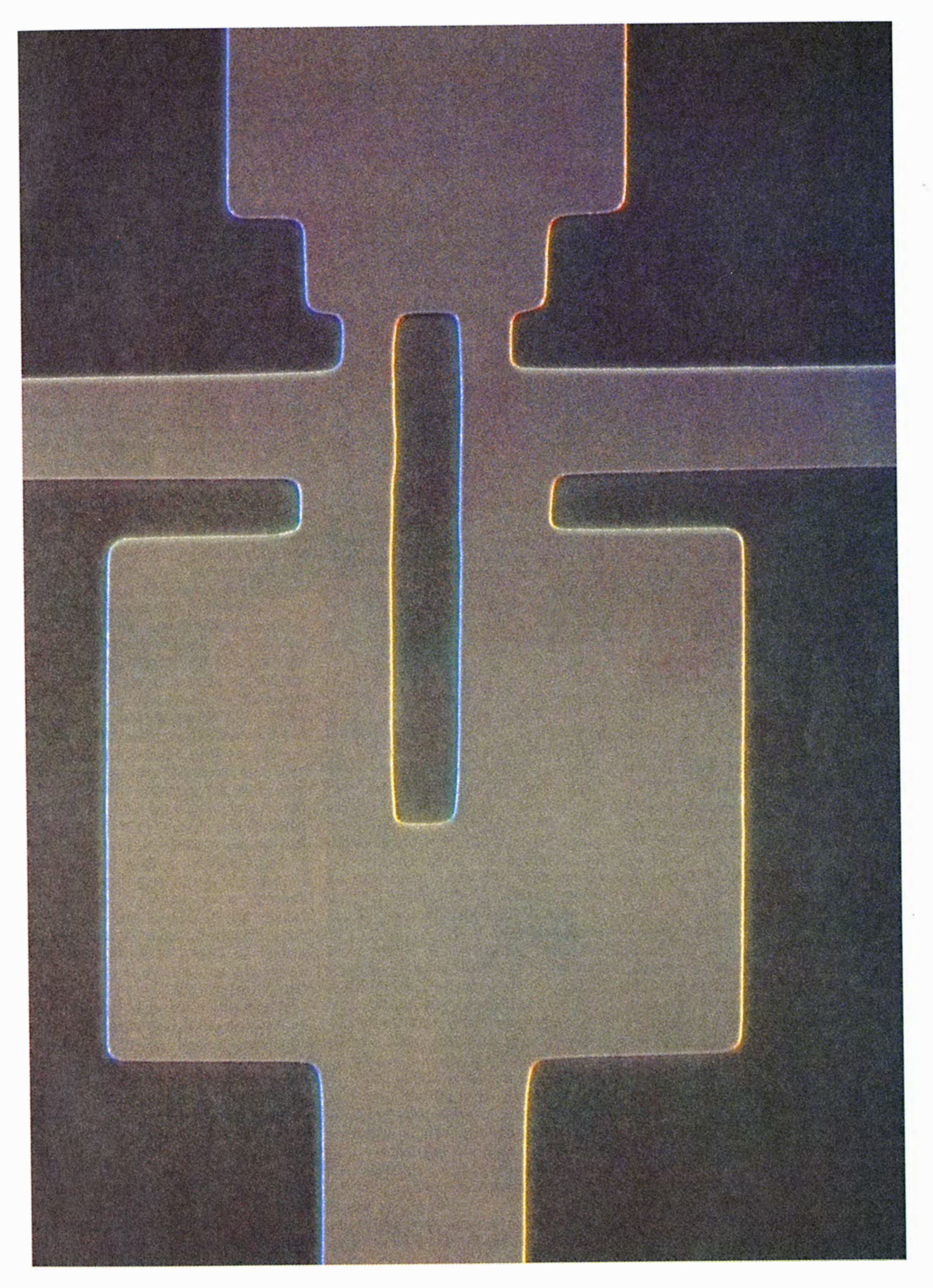
La explicación de por qué los materiales se vuelven superconductores tardó bastante en llegar. Hubo que esperar hasta 1957, cuando John Bardeen, Leon N. Cooper y J. Robert Schrieffer publicaron el artículo fundacional donde daban cuenta de un trabajo teórico que también merecería el premio Nobel. El motivo central de su idea, la teoría BCS, es el par de Cooper: dos electrones de espín y momento opuestos se ligan, de manera que su espín y momento netos son nulos. La fuerza de atracción que actúa en este emparejamiento es una interacción sutil entre la carga negativa de los electrones y la carga positiva de los centros ionizados del material superconductor. Estos centros ionizados son átomos que han perdido uno o varios electrones externos, que quedan libres para conducir la electricidad. Un electrón atrae hacia sí los centros ionizados a medida que se mueve por la red del sólido, creándose una región donde aumenta la carga positiva, que atrae a otro electrón próximo. Los dos electrones se enlazan débilmente, con una energía de un milielectronvolt.

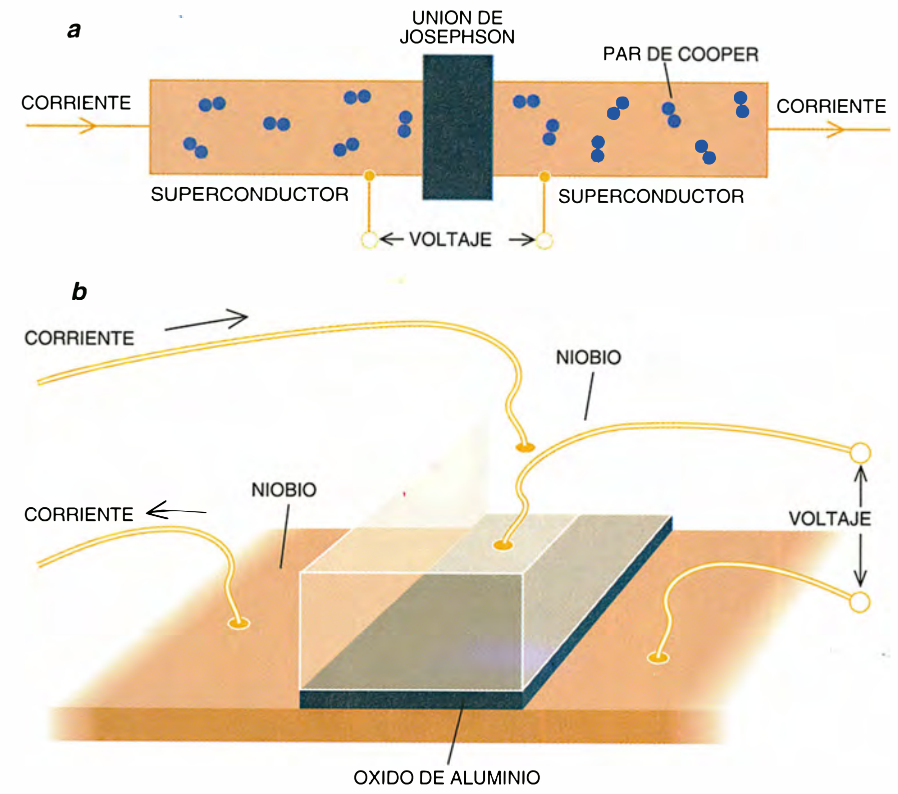
¿Por qué los electrones emparejados se mueven sin resistencia y los electrones sueltos no? En los conductores ordinarios, las impurezas, los defectos y, especialmente, las vibraciones de la red —los fonones— desvían el movimiento de los electrones libres. Esta dispersión de los electrones dota de resistencia a la sustancia. La energía de enlace de los electrones de un par de Cooper es pequeña, pero no hasta el punto de impedir que la dispersión separe la pareja, y así los pares de Cooper se propagan por el material sin resistencia. El enfriamiento profundo

JOHN CLARKE, profesor de la Universidad de California en Berkeley, desarrolla su investigación en el Laboratorio Lawrence. Formado en la Universidad de Cambridge, pertenece a la Regia Sociedad de Londres, a la Sociedad Americana de Física y a la Asociación Americana para el Progreso de las Ciencias. Ha dedicado la mayor parte de su carrera a la superconductividad.



1. MAGNETOMETRO DE SQUID, grabado en una capa de un superconductor de alta temperatura. El SQUID propiamente dicho (*fotografía*) tiene una anchura de unos 30 micrometros. Las dos fronteras de grano que hacen de uniones de Josephson (*no se ven*) caen encima de la banda horizontal que atraviesa la imagen. La banda está acoplada a un bucle captador, de unos ocho milímetros de ancho (*diagrama*).





2. LA UNION DE JOSEPHSON consiste en una barrera aislante que separa dos superconductores (*a*). Los pares de Cooper de electrones atraviesan por efecto túnel cuántico la barrera. En la realización práctica de la unión (*b*), una película de óxido de aluminio, constituida en barrera, separa dos capas de niobio. A continuación, se graba un patrón en esta "tricapa", acumulada sobre un sustrato de silicio en una cámara de vacío, de manera que se formen uniones de Josephson.

es esencial porque apaga las vibraciones de la red. A temperaturas mayores, las energías térmicas acaban por romper el par de Cooper.

Hay un hecho notable relativo a la función de onda de la superconductividad. La función de onda es una herramienta matemática que los físicos emplean para representar las partículas de los sistemas cuánticos. Como todas las ondas, esta función tiene amplitud y fase. Da la probabilidad de que cierta partícula esté en cierto sitio en un instante determinado. Lo curioso de los superconductores es que una sola función de ondas describa la colección entera de pares de Cooper. Cuando no pasa ninguna corriente, todos los pares tienen la misma fase: se dice que son coherentes en fase.

Brian D. Josephson aportó la tercera investigación en las raíces mismas del SQUID que mereció el Nobel: predijo el efecto que ahora lleva su nombre. En 1962 examinó el sistema que formaba un par de superconductores separados por una capa de material aislante, una barrera al paso de la corriente. La función de ondas mecanocuántica asociada con los pares de Cooper gotea sobre esta región "prohibida" desde cada lado. Si la barrera no es demasiado gruesa, las dos funciones se solapan, y si el solapamiento es lo bastante grande, las fases de las dos funciones de onda se quedan pegadas. Bajo estas condiciones, los pares de Cooper pueden atravesar la barrera por efecto túnel, sin romperse. La unión actúa, pues, como un superconductor débil. La corriente crítica, la máxima supercorriente que puede pasar por la unión, depende del tamaño de ésta, del material superconductor y de la temperatura.

A este fenómeno se le llama efecto Josephson de corriente continua (cc). Philip W. Anderson y John M. Rowell lo verificaron experimentalmente. También existe un efecto de corriente alterna (ca). En este caso, un voltaje que se mantiene a través de la unión hace que la amplitud de la supercorriente oscile en el tiempo.

Como pueden pasar rápidamente del estado superconductor al resistivo —en uno o dos picosegundos—, las uniones de Josephson se incluyen en componentes experimentales ultrarrápidos: circuitos lógicos, registradores de desplazamiento o conversores de analógico a digital. Los laboratorios de patrones de medida también usan la unión de Josephson para mantener la referencia del volt. La irradiación de una unión con ondas micrométricas de una frecuencia dada induce saltos de voltaje: ocurren a voltajes que son múltiplo entero de esa frecuencia.

Además de la resistencia nula y del efecto Josephson, el SQUID se aprovecha de un tercer fenómeno mecanocuántico: la cuantización del flujo. Estamos acostumbrados a pensar que la cuantización sucede a escala atómica —por ejemplo, la ocupación por los electrones de niveles discretos de energía cuando se mueven alrededor del núcleo. Un efecto similar ocurre en los anillos superconductores a escala macroscópica. Supóngase que una corriente fluye alrededor del anillo. Generará un campo magnético que se enhebrará en éste. El producto del campo magnético y del área abarcada por el anillo —el flujo magnético— no puede tomar un valor arbitrario. Tiene que ser igual a un número entero de veces una cantidad que recibe el nombre de cuanto de flujo y que es pequeñísima: un eritrocito, de unas siete micras de tamaño, viene a abrazar en el campo magnético de la Tierra (unos 0,00005 teslas) un cuanto de flujo.

El SQUID cc consta de dos uniones Josephson dispuestas sobre un anillo superconductor. Al aplicar una corriente al SQUID (al sesgarlo), se envían pares de Cooper de electrones por efecto túnel a través de las uniones. Pero la aplicación de un campo magnético al anillo altera el flujo. Específicamente, cambia la diferencia de fase mecanocuántica a lo largo de cada una de las dos uniones. Y, a su vez, estos cambios de fase afectan a la corriente crítica del SQUID. Un aumento o una disminución progresivos del campo magnético provocan que la corriente crítica oscile entre un valor máximo y un valor mínimo. El máximo se da cuando el flujo administrado al SQUID es igual a un número entero de cuantos de flujo a través del anillo; el mínimo, cuando ese número es semientero. (El flujo aplicado al SQUID puede tomar cualquier valor, en tanto que el flujo contenido dentro de un anillo superconductor cerrado ha de ser un número entero.) En la práctica, no medimos la corriente sino el voltaje en el SQUID, que va y viene bajo un campo magnético que cambia de manera constante.

Este efecto de interferencia cuántica nos proporciona un magnetómetro digital. Cada "dígito" representa un cuanto de flujo. En realidad, la electrónica corriente puede detectar voltajes que corresponden a cambios del flujo magnético de mucho menos de un cuanto

de flujo. El SQUID es, en esencia, un transductor de flujo que convierte un cambio minúsculo del flujo magnético en un voltaje.

En mis días estudiantiles de Cambridge, Brian Pippard, supervisor de mis trabajos, propuso que usase un SQUID para construir un voltímetro sensible. Por entonces, los procedimientos de elaboración de uniones de Josephson estaban en mantillas y no podíamos pensar en ellos para fabricar instrumentos. Cierto día de principios de 1965, discutí este problema con Paul C. Wraight. El sugirió que un pedazo fundido de soldadura (aleación de plomo y estaño que se vuelve superconductora en helio líquido) depositado sobre un alambre de niobio podría formar una unión de Josephson. Fundábase en que el niobio tiene una capa de óxido natural que a lo mejor valdría de barrera de efecto túnel.

Tomamos unos centímetros de alambre de niobio, fundimos sobre él un pedazo de soldadura, le adherimos unos plomos y lo introdujimos en helio líquido. Y como esperábamos, ¡ahí estaba el efecto túnel de Josephson! Más tarde hice un voltímetro capaz de medir 10 femtovolts (10^{-14} volt), lo que mejoraba los voltímetros semiconductores corrientes en un factor de 100.000.

Ni que decir tiene que la técnica de los sensores SQUID se ha desarrollado en los años que han pasado desde entonces hasta extremos irreconocibles. La mayoría de los prototipos modernos siguen un diseño propuesto por Mark B. Ketchen y Jeffrey M. Jaycox. Constan de múltiples capas de películas delgadas depositadas sobre obleas de silicio. Los patrones se inscriben en esas películas mediante las técnicas fotolitográficas y de grabación de la industria de los semiconductores. Se producen así hasta 400 SQUID en una oblea de diez centímetros, que se recorta en pastillas ("chips"), cada una de las cuales porta un SQUID. El SQUID propiamente dicho consiste en una arandela cuadrada de niobio con dos uniones de efecto túnel de Josephson. Las barreras están formadas por la acumulación de óxido de aluminio, aislante eléctrico, sobre una de las capas de niobio.

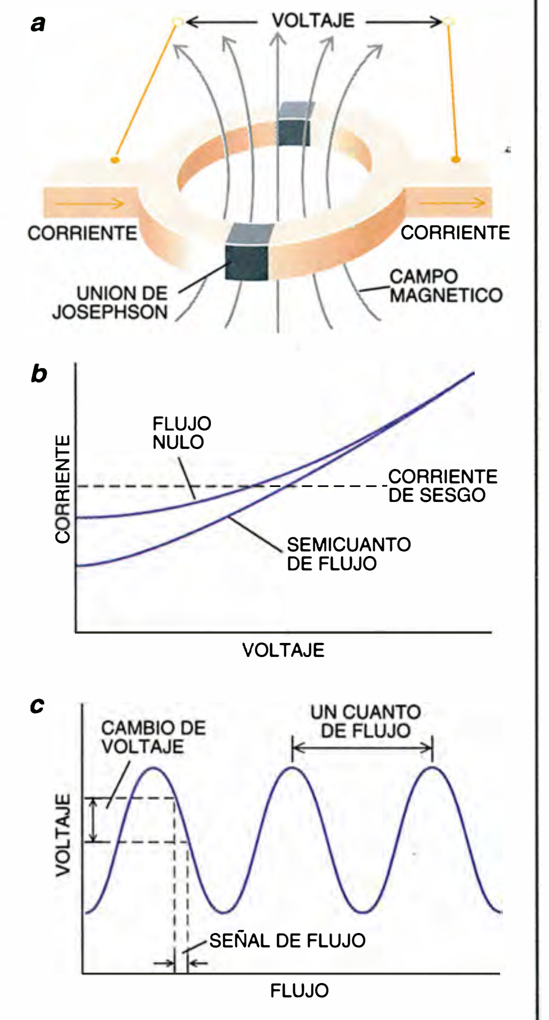
Para determinar la sensibilidad de un SQUID, nos sirve de criterio la energía asociada al menor cambio del flujo magnético que el dispositivo pueda detectar en un segundo: alrededor de 10^{-32} joule. Esta cantidad es más o menos igual a la energía mecánica que se requiere para levantar un solo electrón un milímetro en el campo gravitatorio terrestre. Los mejores SQUID que se han construido centuplican esa sensibilidad. Se acercan al tope impuesto por el principio de incertidumbre de Heisenberg, que establece límites fundamentales a la precisión de las mediciones.

Hay también SQUID basados en la corriente alterna. Son los SQUID de radiofrecuencia (rf), cuyo sesgo se efectúa mediante un flujo que oscila en un margen de megahertzs. El dispositivo consta de una sola unión Josephson situada en un bucle superconductor, que está acoplado a un inductor conectado a través de un condensador. Este diseño forma un circuito resonante, impulsado por una corriente rf. La amplitud del voltaje rf a lo largo de este circuito oscila en respuesta al flujo magnético.

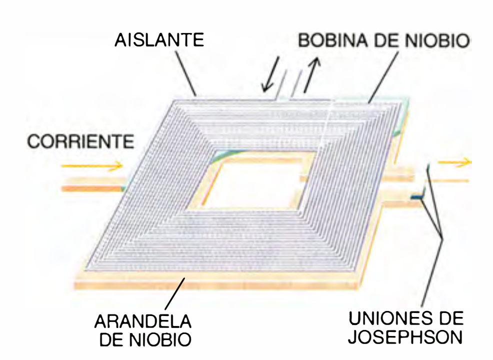
Los fabricantes vendían SQUID rf mucho antes de que suministraran los SQUID cc, a pesar de que los de corriente continua suelen ser más sensibles. Los SQUID rf, de construcción más fácil, necesitan sólo una unión. Pero la técnica avanzada de las películas delgadas permite ahora la producción fiable de uniones en gran número.

Para sacar partido de la extraordinaria sensibilidad del SQUID, casi siempre se acoplan los dispositivos a un circuito de entrada. En los magnetómetros, el circuito centuplica la sensibilidad del SQUID a los campos

El SQUID de corriente continua



El SQUID de corriente continua (cc) consta de dos uniones de Josephson dispuestas sobre un anillo superconductor (*a*). Una corriente aplicada al SQUID, la corriente de sesgo, se divide entre las uniones y, si es mayor que la corriente crítica, produce un voltaje a lo largo del SQUID. La representación gráfica de esta corriente en función del voltaje da unas curvas características (*b*). El aumento constante del flujo magnético que se enhebra en el anillo hace que la corriente crítica decrezca y luego crezca, sucesivamente. La corriente crítica es máxima cuando el flujo es nulo (o un número entero de cuantos de flujo) y mínima cuando vale un número semientero de cuantos de flujo. El período de esas oscilaciones es el cuanto de flujo (*c*). Este efecto tiene un estrecho parecido con el experimento óptico de la doble rendija: cuando pasa luz coherente (como la de un láser) por dos rendijas paralelas, los haces que emergen se interfieren mutuamente, lo que genera una serie de bandas de luz y oscuridad. En un superconductor, una sola función de ondas describe todos los pares de Cooper. Las funciones de onda en las dos uniones de Josephson interfieren entre sí, lo que produce los vaivenes de la corriente y el voltaje. En la práctica podemos detectar cambios menores que el cuanto de flujo. Una minúscula señal de flujo produce un vaivén correspondiente del voltaje a lo largo del SQUID.



magnéticos. Este transformador de flujo —así se le llama— consiste en un bucle de material superconductor acoplado a un SQUID. El transformador de flujo incrementa la sensibilidad del campo porque el bucle cierra un área mucho mayor que la que un SQUID podría abarcar. Un campo magnético externo hace que una supercorriente persistente circule por el bucle. Esta corriente induce un flujo en el SQUID. Con el transformador de flujo, un SQUID alcanza una resolución de una femtotesla (10^{-15} tesla). Una femtotesla viene a ser una parte en 10^{11} del campo magnético de la Tierra.

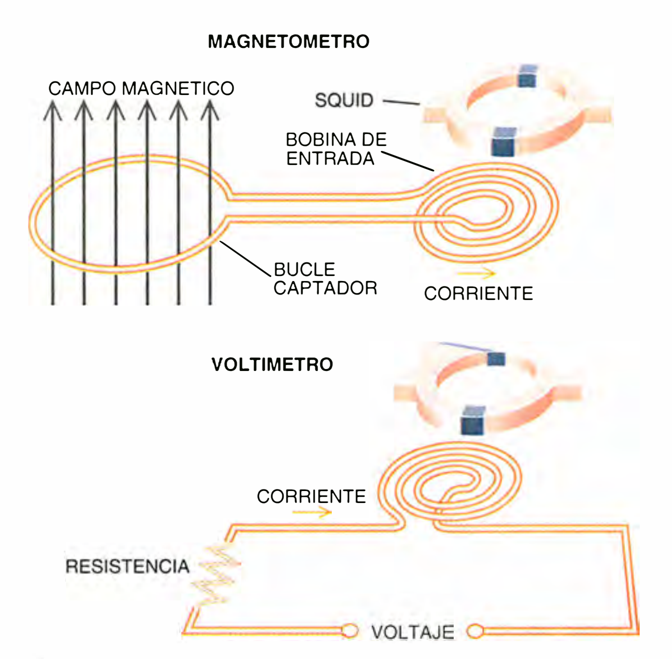
Otra variante del magnetómetro SQUID es el gradiómetro SQUID. Mide la diferencia entre los valores del campo magnético en dos partes diferentes, es decir, el gradiente. El gradiómetro se basa en dos bucles transformadores de flujo arrollados en diferentes direcciones. Otro modelo emplea dos magnetómetros de SQUID separados por una corta distancia; los circuitos electrónicos sustraen entonces una salida de la otra para determinar cómo cambia el campo a lo largo de esa distancia. Se recomienda este método cuando ha de aplicarse a grandes series de magnetómetros. Una variante es la del grupo de Roger H. Koch que desarrollaron el "gradiómetro de tres SQUID". La salida de uno de los canales de magnetómetro del dispositivo anula el ruido magnético ambiental en los otros dos, con lo que se le crea al gradiómetro un entorno silencioso.

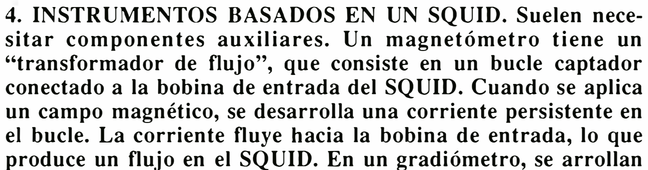
La medición de los gradientes del campo magnético es especialmente útil para el diagnóstico clínico: las corrientes eléctricas del cuerpo humano proporcionan una rica fuente de señales magnéticas que varían con el tiempo. Las minúsculas señales magnéticas tienen una intensidad que va de unas pocas femtoteslas, cuando proceden del cerebro, a las 50.000 que manan del corazón. Hasta el desarrollo de los SQUID, eran demasiado débiles para que se las estudiase. Además, las fluctuaciones del campo magnético terrestre y el ruido magnético que crean el movimiento de los ascensores y de los automóviles y, particularmente, el murmullo a 60 hertz de la red eléctrica, ahogan las señales magnéticas del cuerpo. El gradiómetro SQUID atenúa el ruido de fondo porque las fuentes suelen estar lejos del paciente y tienden a ser casi uniformes: provocan sólo una débil respuesta del gradiómetro SQUID, sensible a los campos no uniformes.

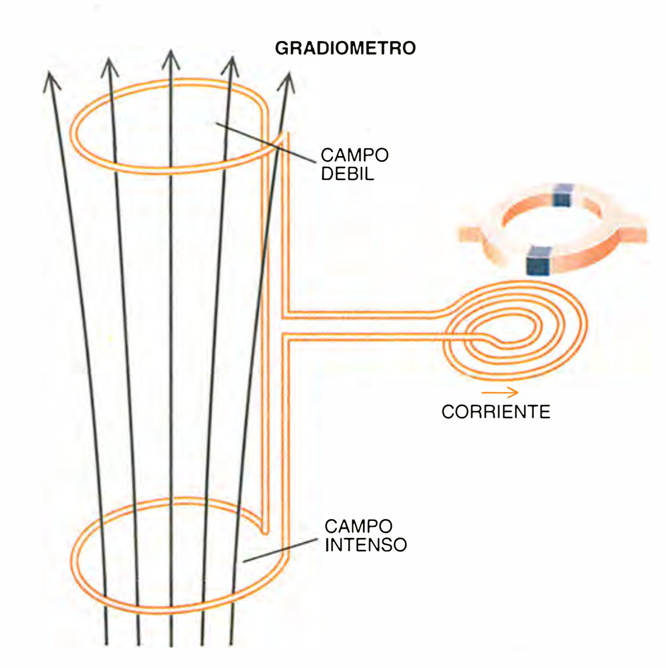
Una serie de sensores SQUID cartografía la variación espacial de los campos magnéticos que el cuerpo produce. A partir de este mapa de contorno, un ordenador reconstruye la región interna del cuerpo donde se generaron las señales. Se trata de un procedimiento inocuo. En veinte años, el número de SQUID en la serie ha crecido de siete a más de cien. El Laboratorio de Sensores Superconductores de Inzai Chiba ha preparado un sistema con 250 canales.

Estos instrumentos proporcionan al

3. EL SQUID DE CORRIENTE CONTINUA hecho de material superconductor al uso funciona en helio líquido. En su configuración más difundida, consta de varias capas de película delgada (*diagrama*). El cuerpo del SQUID es una arandela cuadrada de niobio. Hay una unión de Josephson a cada parte de la rendija existente en el lado derecho de la arandela. Sobre una capa aislante está depositada una bobina espiral de niobio de veinte vueltas; la bobina se conecta con el exterior mediante las dos tiras de la parte superior de la fotografía.







4. INSTRUMENTOS BASADOS EN UN SQUID. Suelen necesitar componentes auxiliares. Un magnetómetro tiene un "transformador de flujo", que consiste en un bucle captador conectado a la bobina de entrada del SQUID. Cuando se aplica un campo magnético, se desarrolla una corriente persistente en el bucle. La corriente fluye hacia la bobina de entrada, lo que produce un flujo en el SQUID. En un gradiómetro, se arrollan dos bucles captadores, de sentido opuesto para medir el campo magnético en lugares distintos a la vez. Se desarrolla un flujo en el SQUID sólo si el campo no es el mismo en esos puntos. En un voltímetro basado en un SQUID, un voltaje en las terminales de entrada produce una corriente igual a este voltaje dividido por el valor de la resistencia conectada a la bobina de entrada del SQUID.

médico una información crucial sobre varias enfermedades. Por ejemplo: en los pacientes que sufren de epilepsia focal, el acceso se debe a una descarga eléctrica en el cerebro, relativamente localizada. El mapa de las espigas del campo magnético obtenido por una serie de SQUID precisa dónde se halla la fuente de la descarga. Al superponer la fuente sobre una imagen generada mediante resonancia magnética podría darse una correlación entre la fuente y la anomalía, un tejido escarificado, por ejemplo. Cuando las circunstancias son favorables, el cirujano puede extirparlo o destruirlo con un "cuchillo gamma" —con rayos gamma colimados. Un método diferente consiste en incitar una reacción magnética por medio de un estímulo específico. En este contexto, Eugene C. Hirschkoff y Christopher C. Gallen usan un SQUID de 74 canales para cartografiar la reacción, a la estimulación táctil, de la corteza cerebral en los alrededores de un tumor.

Otra aplicación médica de amplio interés se refiere al corazón. La arritmia cardiaca —el latido errático— está causada por la existencia de caminos eléctricos espurios que conectan las aurículas y los ventrículos y crean cortocircuitos en las señales cardiacas normales. En ciertos casos la arritmia puede ser fatal. Para tratar esta dolencia (con una descarga eléctrica administrada con catéter), hay que localizar el camino espurio, lo que a veces requiere una búsqueda prolongada con uno o más catéteres. Varios grupos, entre ellos el de Gerhard Stroink, han mostrado que gracias a la generación de imágenes por medio de un SQUID es posible encontrar el sitio de la descarga eléctrica. De esta manera, los SQUID pueden reducir sustancialmente el tiempo invertido en hallar la anomalía.

A pesar de los impresionantes resultados de las mediciones biomagnéticas, el alto costo de las máquinas multicanales ha impedido su generalización. Sin embargo, esta técnica tiene el potencial de reducir los costes sanitarios muy notablemente. La localización del foco epiléptico con los SQUID puede llevar alrededor de tres horas; el otro método —la implantación de electrodos en la superficie del cerebro— dura hasta una semana. De manera similar, la extirpación de un tumor cerebral sin que haya una pérdida importante de la función neuronal previene el trauma del paciente y ahorra el costo, enorme, de la rehabilitación.

Los SQUID desempeñan también un papel esencial en incontables aplicaciones no médicas. Un SQUID le ha puesto hace poco una cota superior a la masa del fotón (si tiene alguna: la teoría corriente dicta que no). Los datos indican que ha de ser menor que unos 10^{-46} gramos. Este límite es el más estricto que se haya establecido hasta ahora en un experimento de laboratorio criogénico.

El SQUID halla otra aplicación fundamental en los intentos de detectar ondas gravitacionales. La relatividad predice que esas ondas —desplazamientos en el espacio y el tiempo— han de abundar en el universo. Las estrellas que colapsan, los agujeros negros y otros movimientos de cuerpos celestes densos tendrían que rizar el espacio en todas las direcciones. Se pretende captar esos recorridos con barras metálicas gigantescas, que pesan unas cinco toneladas y se las enfría con helio líquido: la recepción de una onda gravitacional debería hacer que las barras sufriesen unas oscilaciones longitudinales minúsculas. El desplazamiento del extremo de la barra se detecta en forma de un cambio de flujo en el SQUID; la resolución es de 10^{-18} metros —aproximadamente 0,001 veces el diámetro de un núcleo átomico. Hay varias antenas de ondas de gravedad instaladas por el mundo. Hasta la fecha, ninguna ha registrado esas ondas. Pero lo más probable es que la próxima generación que entre en servicio, cuya sensibilidad será mayor quizás en dos órdenes de magnitud, lo haga.

Posiblemente el sistema más difundido basado en el SQUID sea el depurado "susceptómetro" que fabrica Quantum Design, de San Diego: permite medir las propiedades magnéti-

cas de las muestras desde temperaturas de unos pocos kelvin hasta superiores a la temperatura ambiente.

El interés renacido por los SQUID se debe a J. Georg Bednorz y K. Alexander Müller, quienes descubrieron los superconductores de altas temperaturas (que supusieron el cuarto premio Nobel recibido por esta especialidad). Otros investigadores llevaron rápidamente la temperatura de transición por encima de los cien kelvin (−173 grados centígrados).

Los medios de comunicación saludaron este avance como la mayor revolución desde la bombilla (o, quizá, sólo desde el transistor). Pero, como pasa con todas las innovaciones científicas, el progreso lleva su tiempo. Hoy por hoy, los únicos dispositivos disponibles comercialmente que aprovechan ese logro son los SQUID.

A diferencia de la mayoría de los superconductores corrientes, los materiales de altas temperaturas son cerámicas que se organizan en capas complejas. Al menos para dispositivos como el SQUID, el material habitual es un óxido de itrio, bario y cobre, de fórmula $YBa_2Cu_3O_{7-x}$, donde x vale aproximadamente 0,15. La temperatura de transición del YBCO, como se le abrevia, es de unos 90 kelvin; se vuelve, pues, superconductor a la temperatura del nitrógeno líquido.

Al tratarse de cerámicas, los nuevos superconductores son frágiles y no resulta fácil trabajar con ellos. No se pueden doblar los alambres inmediatamente para darles la forma que se quiera, lo que sí permiten los superconductores de baja temperatura, bastante dúctiles. Se han ideado diversos procedimientos para hacer con los de alta temperatura películas delgadas de gran calidad. Entre ellos, el depósito mediante un láser excímero pulsante de alta energía ha probado ser muy útil. Los pulsos de láser pertenencen a la parte ultravioleta del espectro de la luz, con una longitud de onda típica de 248 nanómetros. Caen sobre un blanco de YBCO que rota montado en una cámara que contiene oxígeno. Cada pulso vaporiza una pequeña cantidad de YBCO, formándose un penacho rosáceo. El material se recoge en un sustrato cercano que se mantiene a unos 800 grados centígrados. La película crece epitaxialmente —su estructura cristalina imita la del sustrato— con la composición química correcta.

Además de formar los SQUID como películas delgadas, sus constructores han de crear uniones de Josephson en la oblea. Se han inventado muchos procesos ingeniosos para obtenerlas en los compuestos de alta temperatura. El equipo de Duane Dimos ha elaborado un método fructífero. Se empieza con un cristal, usualmente de titanato de estroncio, que se ha cortado y fusionado de nuevo de manera que se produzca una orientación deliberadamente errónea de los ejes del cristal a lo largo de una línea. A esta dislocación se le llama frontera de grano. Cuando la película de YBCO crece epitaxialmente sobre el sustrato, copia el cambio brusco de la orientación del cristal. La frontera de grano reduce la capacidad que tiene el YBCO de permitir el paso de supercorrientes, con lo que se comporta como una unión de Josephson. Otra forma de hacer con éxito uniones requiere un bocadillo epitaxial: se interpone una lámina delgada de material normal entre dos superconductores.

Los SQUID de altas temperaturas dependen de un transformador de flujo para mejorar su sensibilidad a los campos magnéticos. Por eso se construye el transformador de flujo en la misma capa de YBCO que el SQUID. Un segundo transformador puede incrementar más la sensibilidad. Con el último de estos diseños, Dieter Koelle y sus colaboradores consiguieron un nivel de ruido de unas 30 femtoteslas. El grupo de Michael Münk logró 24 femtoteslas mediante el acoplamiento de un transformador similar a un SQUID rf.

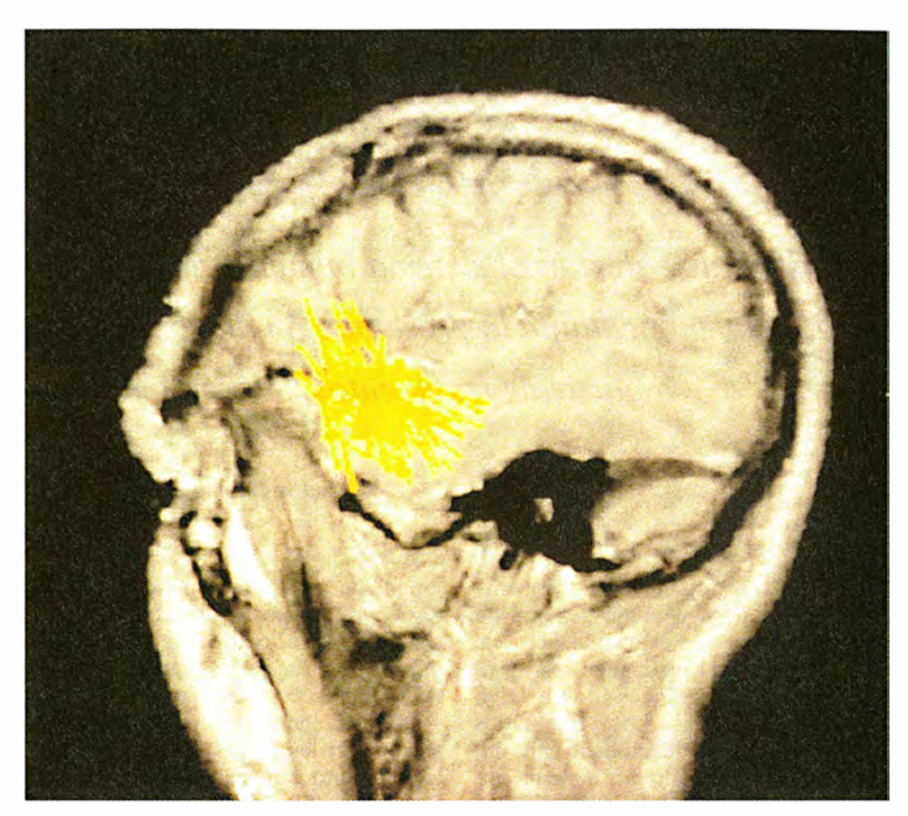
5. ESTA IMAGEN de George Washington se hizo barriendo un billete de un dólar con un SQUID de alta temperatura. Durante el barrido, el SQUID detecta las variaciones del campo magnético que producen las partículas de tinta del billete.

Habría que señalar que los SQUID que funcionan en nitrógeno líquido no obtendrán nunca la resolución de los que trabajan en helio líquido. ¿Por qué están, pues, levantando tanto revuelo los dispositivos de altas temperaturas? Lo justificó gráficamente, hace años, el premio Nobel Ivar Giaever: el helio líquido se paga a precio de whisky escocés; el nitrógeno líquido, al de la leche.

Ocurrencias aparte, el meollo de la cuestión reside en que el nitrógeno líquido se vaporiza mucho más despacio que el helio. En vez de tener que rellenar una vasija de vacío cada pocos días, pasan semanas antes de tener que reponer la carga de nitrógeno líquido. El enfriamiento mediante nitrógeno líquido ofrece, pues, una técnica superconductora al alcance de la mayoría.

Las esperanzas crecientes que suscitan los SQUID de alta temperatura se hacen evidentes en la investigación geofísica, que a menudo se practica en lugares inaccesibles. Quienes se dedican al estudio de la magnetotelúrica, miden la resistencia eléctrica del subsuelo para inferir su estructura. En esencia, se propagan ondas electromagnéticas de muy baja frecuencia (0,01 a 100 hertz) desde la atmósfera superior hacia la superficie de la Tierra; las genera el viento solar que sopla sobre las capas cargadas de la magnetosfera o de la ionosfera. Se reflejan en el suelo, pero una de sus componentes se separa y adentra en él. Al medir los diminutos y fluctuantes campos magnéticos (por medio de magnetómetros) y eléctricos (con electrodos enterrados), el geofísico cartografía la resistencia de la corteza terrestre en profundidades de decenas de kilómetros. De esta información infiere la hidrología y la porosidad subsuperficiales, en busca de valiosas pistas del paradero del petróleo o de fuentes de energía geotérmica. En técnicas complementarias, el geofísico aporta los pulsos magnéticos y mide la respuesta. Los métodos pulsantes se emplean en los sondeos en busca de petróleo y podrían servir para localizar residuos peligrosos.

Es probable que la comodidad que garantiza el nitrógeno líquido alentará la proliferación de sistemas SQUID en medicina. Ya hay varios grupos de investigación que han usado los SQUID de alta temperatura para sacar magnetocardiogramas e incluso magneto-encefalogramas. Una apasionante extensión de la técnica podría ayudar a la cardiología fetal. La variabilidad del ritmo cardiaco es una de las maneras con que se evalúa la salud del feto, y se pueden tomar electrocardiogramas hasta los meses séptimo u octavo de embarazo. Más allá de ese período, la señal decae porque el feto se aísla eléctricamente de la madre. En cambio, los magnetocardiogramas no resultan afectados. Sin olvidar que la superior resolución espacial de las mediciones magnéticas hace que sea más fácil distinguir de la materna la señal fetal.



6. LA EPILEPSIA FOCAL puede surgir de un defecto neuronal localizado que produzca señales magnéticas. Una serie de SQUID mide las señales, y la posición inferida del foco epiléptico (*área amarilla*) se superpone sobre una imagen de resonancia magnética.

Se empieza a obtener imágenes magnéticas barriendo un objeto con un SQUID. Este "microscopio de barrido SQUID" resuelve objetos hasta una escala de micras de ancho. Encuentra aplicaciones no sólo en el estudio de los materiales magnéticos, sino también de los metales y los circuitos electrónicos, que producen campos magnéticos cuando por ellos pasa una corriente. Se está explorando también el uso de los SQUID en pruebas no destructivas; por ejemplo, en la observación de la corrosión de láminas de aluminio remachadas en los aviones. El SQUID mide la influencia del fuselaje en un campo magnético oscilante que se le aplica; un cambio en la conductividad eléctrica descubre los defectos.

En la presente coyuntura, el SQUID de alta temperatura comercialmente disponible más refinado es "iMAG", una versión del magnetómetro de una sola capa de YBCO. Este instrumento, muy versátil, es adecuado para los experimentos de laboratorio y para los estudios geofísicos y magnetocardiológicos.

Tales SQUID no reemplazarán a sus parientes de baja temperatura en todas las circunstancias. Los detectores de ondas de gravedad y otras aplicaciones cuyos requisitos sean muy exigentes seguirán echando mano del helio líquido. Los dispositivos basados en el nitrógeno líquido, sin embargo, abrirán todo un abanico de posibilidades que antes estaban vedadas; así sacarán a esta técnica maravillosamente sensible del laboratorio y de la investigación clínica y la llevarán al mercado.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

CARDIOMAGNETIC IMAGING. Gerhard Stroink, en *Frontiers in Cardiovacular Imaging.* Dirigido por B. L. Zaret, L. Kaufman, A. S. Berson y R. A. Dunn. Raven Press, 1993.

MAPPING THE BRAIN WITH MSI. Christopher C. Gallen y Floyd E. Bloom en *Current Biology*, vol. 3, n.º 8, páginas 522-524; agosto de 1993.

SQUIDs: THEORY AND PRACTICE. John Clarke, en *The New Superconducting Electronics.* Dirigido por H. Weinstock y R. W. Ralston. Kluwer Academic Publishers, 1993.

Presentación celular de los antígenos

Las células alertan al sistema inmunitario de la existencia de una infección. Lo hacen mediante la presentación de complejos moleculares construidos a partir de fragmentos de proteínas propias y foráneas

Victor H. Engelhard

Todos los organismos pluricelulares poseen algún sistema de defensa, por elemental que sea, en virtud del cual distinguen los agentes patógenos foráneos como algo ajeno y los elimina. Los vertebrados superiores han perfeccionado sus defensas y desarrollado un sistema inmunitario que discrimina entre diferentes patógenos, ante cada uno de los cuales responde de manera selectiva. Merced a tal especificidad, el sistema inmunitario se adapta rápidamente a los patógenos que con mayor frecuencia se encuentran en su propio entorno.

En términos moleculares, la vigilancia que opera el sistema inmunitario de los vertebrados se centra en la búsqueda de antígenos —moléculas diana inmunológicas—, que indican la presencia de un invasor. Los antígenos no son meros fragmentos del patógeno. A menudo, constituyen moléculas construidas por el hospedador a partir de trozos de proteínas del agente patógeno y de ciertas proteínas celulares, las moléculas del complejo principal de histocompatibilidad (MHC). El procesado y el ensamblaje de los antígenos encierran la clave de la flexibilidad, la especificidad y la precisión de todas las respuestas inmunitarias.

La elaboración de los antígenos y su presentación en la superficie celular, para su inspección por el sistema inmunitario, constituyen un fenómeno complejo. Conocemos muchas etapas del mismo. Conviene resaltar que el procesado de los antígenos está vinculado a los mecanismos de síntesis y reciclaje de todas las proteínas en el interior de las células y al mecanismo de su transporte a través de distintos compartimentos.

Importa, antes de proseguir, traer a colación las líneas básicas del funcionamiento del sistema inmunitario. Para conseguir la especificidad de las respuestas, el sistema inmunitario emplea una población copiosa de linfocitos. Estos leucocitos poseen receptores de superficie que se unen con gran afinidad a los antígenos. Cada linfocito exhibe receptores cuya estructura difiere algo de la estructura expresada por los demás; cada linfocito muestra, pues, una especificidad precisa para un tipo de antígeno. En el hombre, la población linfocítica podría expresar más de 10^8 receptores antigénicos distintos. Con semejante arsenal defensivo, el sistema inmunitario está listo para responder, con ajustada especificidad, ante casi cualquier antígeno foráneo que halle en su camino.

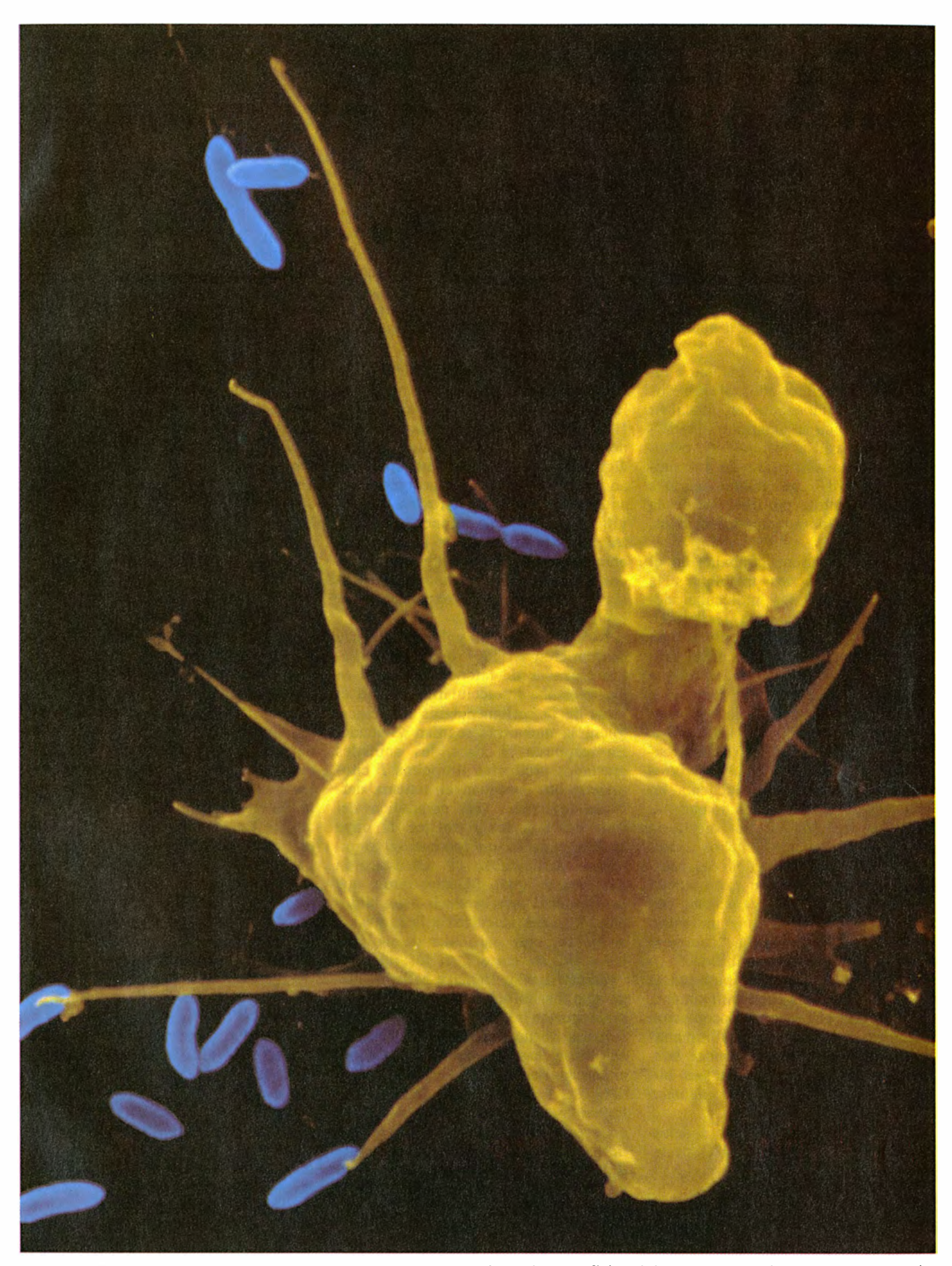
El sistema inmunitario adapta la respuesta a la naturaleza del patógeno y a su estrategia invasora. Bacterias y macroparásitos originan infecciones en los espacios extracelulares del torrente sanguíneo o la luz intestinal. Para controlar estos organismos, el sistema inmunitario despliega receptores antigénicos solubles: los anticuerpos, producidos por los linfocitos *B*. Los anticuerpos, enlazados directamente al parásito, crean un blanco que habrán de abatir otras moléculas y células del sistema inmunitario.

Más reacios al control son virus, otras bacterias y protozoos parásitos, como los causantes de la malaria, la enfermedad del sueño y la leishmaniasis. Se trata de agentes que establecen sus infecciones en el interior celular, lejos del alcance de los anticuerpos. Para destruir tales patógenos, entra en acción otro cuerpo de ejército del sistema inmunitario de defensa. Las células del hospedador portan en su superficie moléculas del MHC. En las células infectadas, estas moléculas del MHC se engarzan en péptidos pequeños procedentes del parásito y los exhiben. Los complejos constituidos por péptidos parasitarios y moléculas MHC del parasitado forman los antígenos que habrán de ser reconocidos por receptores antigénicos sitos sobre linfocitos *T* citotóxicos (asesinos). Por esa vía los linfocitos *T* identifican y destruyen selectivamente células infectadas, sin atacar a las sanas. Entre las misiones de los complejos MHC-péptido, una es, pues, convertirse en señal indicadora de que se ha producido la infección de la célula.

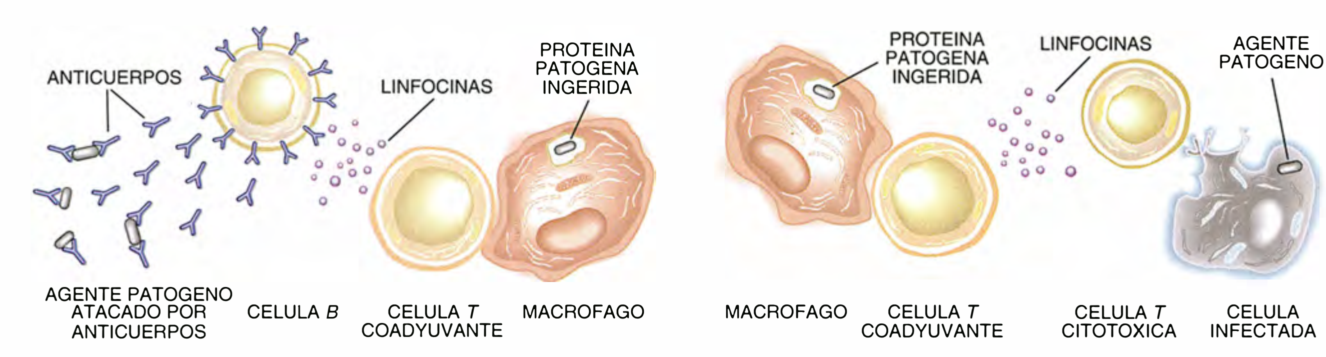
Los complejos MHC-péptido intervienen también en la regulación de la respuesta inmunitaria. Algunas células especializadas, así los macrófagos, se mueven por todo el organismo, ingieren los materiales extracelulares que encuentran a su paso, los degradan en péptidos y presentan éstos constituidos en antígenos. Tales leucocitos presentadores de antígenos viajan desde el punto de infección hasta los ganglios linfáticos; aquí reclutan linfocitos para la respuesta inmunitaria. Por tanto, las células presentadoras de antígenos vienen a ser los mensajeros llegados de la línea de fuego. Cuando los linfocitos *T* coadyuvantes ("helper") descubren un complejo MHC-péptido sobre tales células presentadoras de antígenos, segregan linfocinas, moléculas que promueven la diferenciación de las células del sistema inmunitario.

El reconocimiento de un complejo MHC-péptido en la superficie de una célula constituye un paso decisivo para el desencadenamiento de cualquier respuesta inmunitaria; en particular, de

VICTOR H. ENGELHARD enseña microbiología en la Universidad de Virginia en Charlottesville. En 1993 descubrió la vía alternativa del procesado de antígenos de clase I.



1. INGESTION DE BACTERIAS POR UN MACROFAGO, un aspecto de la respuesta inmunitaria contra la infección. En el interior del leucocito, las proteínas bacterianas se degradan en péptidos que moléculas especializadas se encargan de llevar hasta la superficie celular para que se les reconozca su carácter antigénico. Poco a poco se ha ido avanzando en el conocimiento de las vías mediante las cuales las células convierten en antígenos proteínas propias y foráneas.



2. RECONOCIMIENTO DE ANTIGENOS y respuestas inmunitarias. Cuando las células *T* coadyuvantes reconocen un complejo antigénico, los linfocitos *T* liberan linfocinas. Ante estas señales químicas, las células *B* liberan anticuerpos contra bacterias extracelulares (*izquierda*) y los linfocitos *T* citotóxicos atacan células infectadas con virus (*derecha*). Los complejos antigénicos pueden permitir también que las células *T* citotóxicas identifiquen sus objetivos.

la eliminación eficaz de parásitos intracelulares. Veinte años llevan los inmunólogos empeñados en descubrir cómo se forma el complejo MHC-péptido. Merced a sus trabajos conocemos que la estructura de las moléculas del MHC les permite unirse a péptidos distintos, procedentes de la silva inmensa de agentes infecciosos.

Debemos a quienes trabajan en el dominio de los trasplantes la identificación de las moléculas del MHC. En los años treinta, George D. Snell y Peter A. Gorer describieron un locus, o posición genética, en el cromosoma 17 de ratones que era el determinante primario de la aceptación o rechazo del trasplante de tejido de una cepa a otra. Lo llamaron locus H-2. ("H" por "histocompatibilidad", o aceptación del tejido.) Jean Dausset y otros definieron en los años cincuenta un locus génico similar en el hombre.

La investigación ulterior mostraría que el H-2 contenía muchos genes codificadores de antígenos de trasplante: proteínas que se expresan en la superficie celular y pueden ser reconocidas por el sistema inmunitario. Se acuñó la expresión "complejo principal de histocompatibilidad" (o MHC) para destacar la importancia de este grupo de genes íntimamente asociado con el rechazo y aceptación del injerto. (A las versiones humanas de estas moléculas se las conoce también por antígenos leucocitarios humanos, o HLA, del inglés *Human Leukocyte Antigens.*)

Los antígenos de trasplante determinados por los genes MHC pertenecen a dos tipos esenciales: clase I y clase II. Cada una de estas clases de MHC entraña, a su vez, una gran diversidad; las poblaciones pertenecientes al ratón y al hombre contienen más de cien formas de estas moléculas, aunque los individuos expresen sólo entre tres y seis de cada clase.

Para entender la función fisiológica de las moléculas del MHC hubo que esperar hasta las postrimerías de los años sesenta. Baruj Benacerraf y Hugh O. McDevitt observaron, en líneas de trabajo independientes, que algunos cobayas y ratones producían anticuerpos contra ciertas proteínas antigénicas simples, y otros no. McDevitt cruzó cepas de ratones y demostró que la respuesta y su ausencia eran rasgos genéticamente determinados que dependían del tipo de moléculas MHC de clase II expresadas por los ratones.

Rolf Zinkernagel y Peter Doherty descubrieron en 1974 que algunas cepas cruzadas de ratones morían si se les infectaba intracelularmente con el virus de la coriomeningitis linfocítica, mientras que otras seguían viviendo. En respuesta al virus, los animales afectados producían linfocitos *T* citotóxicos que atacaban al sistema nervioso infectado. (Lo paradójico del caso era que los linfocitos *T*, cuya misión consiste en proteger el organismo, participaban en una reacción autoinmune letal.) Demostraron que la capacidad para producir estos linfocitos *T* estaba vinculada a la expresión de un conjunto particular de moléculas MHC de clase I en los ratones.

Zinkernagel y Doherty hallaron luego que los linfocitos *T* aislados de un ratón podían reconocer las células infectadas de un segundo ratón, aunque sólo en el caso de que ambos ratones expresaran las mismas moléculas MHC de clase I. En resumen, la respuesta inmunitaria se producía exclusivamente en presencia del antígeno correcto y de la molécula MHC correcta. A este doble requisito, de un antígeno foráneo y una molécula apropiada de MHC, se le denominó reconocimiento de antígeno restringido por el MHC.

Los grupos de Alan S. Rosenthal y David H. Katz, entre otros, demostraron que el reconocimiento del antígeno restringido por el MHC explicaba también las observaciones de McDevitt relacionadas con la capacidad de respuesta. Las células *B* no producían anticuerpos frente a los antígenos de proteínas simples de McDevitt a no ser que se estimularan por los linfocitos *T* coadyuvantes. Estos linfocitos *T* reconocían sólo las células presentadoras de antígenos que habían estado expuestas a la proteína antigénica y que ofrecían las moléculas MHC de clase II apropiadas.

A lo largo de los diez años siguientes, se dedicó mucho esfuerzo al mecanismo en virtud del cual las células *T* reconocen el antígeno y las moléculas MHC. Estudios realizados por separado en los laboratorios de Emil R. Unanue y de Howard M. Grey llegaron a un descubrimiento de gran alcance. Observaron que, para estimular una respuesta inmunitaria, las proteínas extracelulares debían penetrar mediante un proceso de endocitosis en el interior de una célula presentadora de antígenos y allí degradarse en péptidos. Estos péptidos se unen entonces a moléculas MHC de clase II y aparecen en la superficie celular formando un complejo reconocible por las células *T* coadyuvantes. Esa secuencia de fenómenos —ingestión del antígeno, fragmentación en péptidos y su unión a las moléculas MHC— forma lo que se conoce por procesado del antígeno.

Las moléculas MHC de clase I están implicadas en el procesado de antígenos. Alain R. M. Townsend observó que los linfocitos *T* citotóxicos identifican las células infectadas por virus mediante la detección de péptidos víricos presentados por una molécula MHC de clase I. Trabajos ulteriores realizados en los laboratorios de Thomas J. Braciale y de Michael J. Bevan pusieron de manifiesto que todos los péptidos presentados naturalmente por las moléculas MHC de clase I derivaban de proteínas pertenecientes al citoplasma celular.

De esos y otros resultados se infiere que los dos tipos de moléculas del MHC toman antígenos procesados en compartimentos intracelulares diferentes. Los péptidos asociados con moléculas MHC de clase I se originan en las proteínas propias de la célula. La fuente proteica de los péptidos asociados con las de la clase II se encuentra a veces en el medio donde crece la célula; pero, con mayor frecuencia, estos péptidos proceden de proteínas localizadas en la membrana externa.

Estas acotaciones nos enseñan algo importante: la mayoría de las moléculas del MHC de una célula presentan péptidos procedentes de proteínas celulares normales y no de proteínas de los patógenos. Aun cuando una célula haya ingerido un antígeno foráneo, o sufrido una infección, el número de moléculas MHC que presentan esos péptidos extraños constituye sólo una pequeña fracción del total.

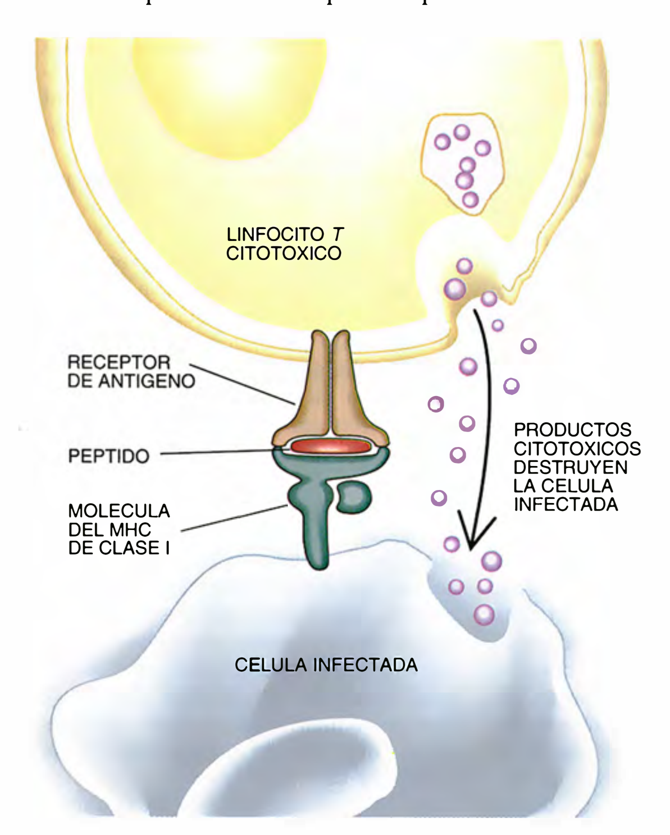
La capacidad de las moléculas MHC para unirse a péptidos específicos y participar en el procesado de antígenos es consecuencia de su estructura y síntesis. Ambas clases de moléculas de MHC constan de dos unidades proteicas. Las moléculas de clase I están formadas por una cadena proteica pesada y una cadena ligera, mucho menor, la β2m. Las dos cadenas de la molécula de clase II, aproximadamente del mismo tamaño, son menores que la cadena pesada de clase I.

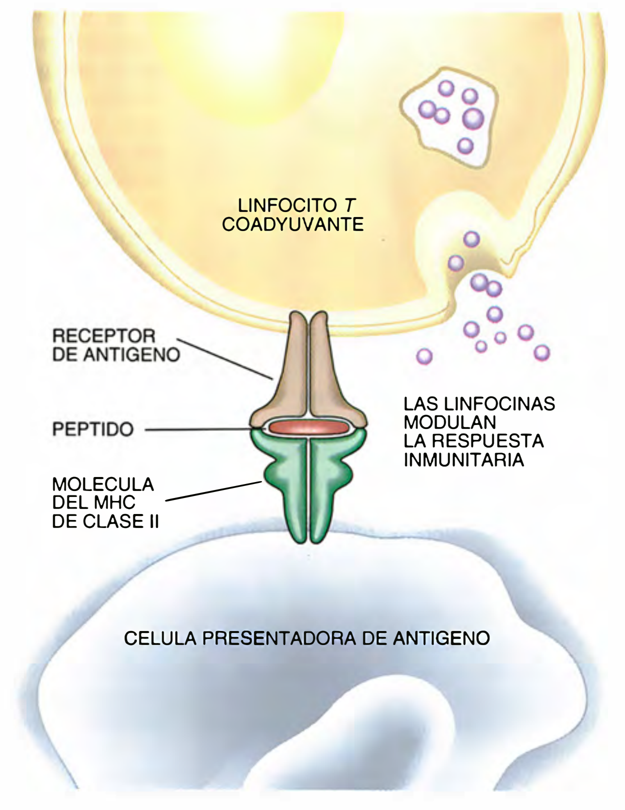
Pese a tales diferencias, los análisis cristalográficos de rayos X llevados a cabo por el grupo de Don C. Wiley han revelado una notable similaridad estructural entre las moléculas MHC de las clases I y II. Ambos tipos presentan una profunda hendidura en la superficie, donde se anclan los péptidos. La estructura de la hendidura, muy compleja, ofrece entrantes que interaccionan con zonas diferentes del péptido. La forma y propiedades de esos entrantes, diferentes para las diversas moléculas de MHC, son las que confieren la afinidad selectiva para determinados péptidos.

Se intenta esclarecer el mecanismo preciso que yace tras esas afinidades. La cristalografía nos ofrece algunas pistas sobre el modo de unión entre péptidos y moléculas MHC. Por su lado, la inmunoquímica se afana en la búsqueda de rasgos comunes entre los péptidos que se unen a una forma de la molécula MHC, aunque la complejidad estructural de los péptidos dificulta mucho la labor.

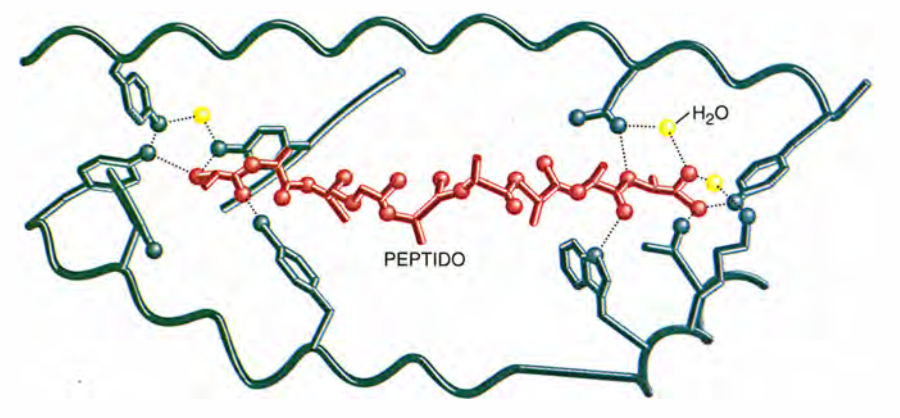
En su auxilio viene la espectrometría de masas en tándem. En un medio ácido los péptidos se desgajan de las moléculas MHC, se purifican y se analizan con el espectrómetro; se determinan las secuencias aminoacídicas de cada péptido. Recurren a esta técnica, entre otros, Robert A. Henderson, Eric L. Huczko y Ye Chen, de mi laboratorio, y Andrea L. Cox, Hanspeter Michel, Wanda M. Bodnar, Theresa A. Davis y Jeffrey Shabanowitz, del laboratorio de Donald F. Hunt en la Universidad de Virginia. Analizan la estructura de péptidos asociados con varias moléculas del MHC de clase I en el hombre. Estos estudios confirman que las moléculas MHC pueden unirse a un grupo amplísimo de péptidos. Una célula humana tiene entre medio millón y un millón de moléculas de clase I pertenecientes a una única forma; calculamos que estas moléculas presentan más de 10.000 péptidos diferentes, aunque la cifra real podría rondar los 100.000.

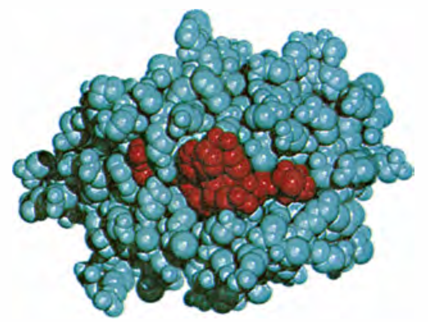
La mayoría de los péptidos asociados con una determinada forma del complejo de la clase I comparten motivos o rasgos estructurales simples relacionados con la unión. Los péptidos que se unen a las moléculas MHC de clase I suelen constar de ocho o nueve aminoácidos, longitud que parece óptima para que los ex-

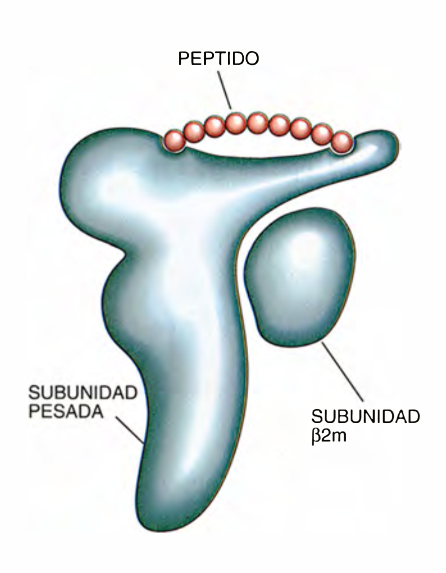




3. COMPLEJOS ANTIGENICOS. Reconocidos por los linfocitos *T*, están formados por moléculas MHC y péptidos. Las moléculas MHC de clase I, que se hallan en todas las células nucleadas del organismo, pueden presentar péptidos procedentes de virus. Las células *T* responden ante la presencia de esos complejos destruyendo la célula infectada (*izquierda*). Las moléculas MHC de clase II, que se dan sólo en las células presentadoras de antígenos, presentan péptidos provenientes de la degradación de proteínas extracelulares. Estos complejos desencadenan la liberación de linfocinas (*derecha*).







4. MOLECULAS MHC de clase I, constituidas por una subunidad pesada y una subunidad ligera β2m (*abajo*). Vistas desde arriba, se distingue la hendidura de la parte superior de la molécula donde se traba el péptido, de unos nueve aminoácidos (*centro*). Los extremos del péptido se mantienen fijos mediante enlaces (*líneas punteadas*) en los entrantes de los bordes de la hendidura (*arriba*).

tremos del péptido —amino y carboxilo— encajen en los entrantes situados en los extremos opuestos de la hendidura de unión del MHC.

Se muestran también muy pertinaces (conservadores) los aminoácidos de ciertas posiciones. Por ejemplo, la mayoría de los péptidos que se unen a la molécula HLA-A2.1, de clase I, del hombre portan el aminoácido leucina en la segunda posición de su extremo amino; en el extremo carboxilo, el último aminoácido es siempre un aminoácido sin carga e hidrófobo. A la inversa, los péptidos que se unen a la molécula HLA-B27 humana tienen el aminoácido arginina en la segunda posición y terminan con un resto aminoacídico cargado positivamente e hidrófilo.

Sumada a otros datos estructurales, esta información abona cierta hipótesis sobre el modo de unión de los péptidos a las moléculas MHC de clase I. Los dos extremos del péptido y dos o tres restos aminoacídicos adicionales encajan en entrantes bien delimitados de la hendidura del MHC. Estas conexiones proporcionan la mayor parte de la energía de enlace entre las moléculas. El resto de la cadena peptídica se extiende sobre la superficie del surco con bastante libertad en sus interacciones con la molécula MHC, lo que significa que esta última puede acomodar diversas estructuras peptídicas. Muchos péptidos derivados de proteínas de patógenos poseen motivos estructurales que permitirían su unión a una molécula del MHC si se dieran las circunstancias adecuadas. Se ha logrado, en unos cuantos casos, predecir qué péptido presentaría una molécula de MHC en una célula infectada.

El lugar de unión del péptido con las moléculas de clase II, aunque parecido al de las moléculas de clase I, ofrece diferencias importantes. Y lo más destacable, la hendidura de enlace de las moléculas de clase II carece de entrantes que atrapen, de manera específica, los extremos del péptido. Aquí, el enlace se establece, en buena medida, a mitad de la hendidura y, por tanto, hacia el centro del péptido unido. En virtud de ello, los péptidos asociados con moléculas de clase II presentan una mayor variación en lo concerniente a su longitud y son, por término medio, bastante más largos que los asociados con la clase I. Muchos péptidos asociados con cualquier forma dada de moléculas de clase II constituyen un grupo anidado: es decir, comparten una zona de la secuencia de los aminoácidos (que se unen dentro del surco del MHC) y varían sólo en las longitudes de sus extremos amino y carboxilo.

La hendidura de enlace de las moléculas de clase II sí contiene entrantes en una posición más central que los de las moléculas de clase I, pero desconocemos su interés en la determinación de los rasgos estructurales que deben presentar los amino-ácidos del péptido. En resumen, apenas si empiezan a esbozarse los motivos estructurales que nos faculten para predecir qué péptidos se unirán a una molécula MHC de clase II.

La asociación con péptidos es un paso normal en la biosíntesis y ensamblaje de las moléculas MHC de clase I y de clase II. Pero no sólo es distinto el origen de los péptidos involucrados con cada clase, difieren también los mecanismos de ensamblaje.

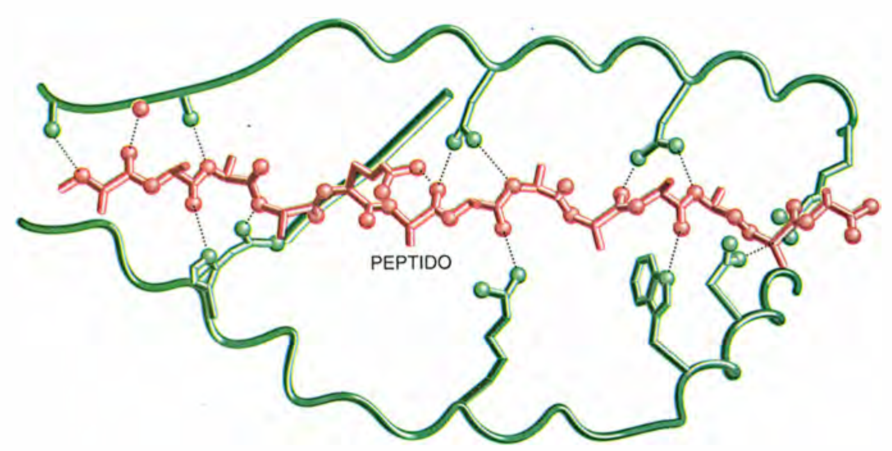
Una vez sintetizadas las subunidades correspondientes a la cadena pesada y la cadena ligera β2m que constituyen las moléculas de clase I, se juntan en el interior del retículo endoplasmático. Si falta la β2m, no puede plegarse bien la cadena pesada, ni, por ende, trasladarse hacia el aparato de Golgi y dirigirse desde este orgánulo membranoso a su destino final en la superficie celular. El complejo cadena pesada-β2m se une también a un péptido mientras se encuentra todavía en el interior del retículo endoplasmático para realizar ese viaje.

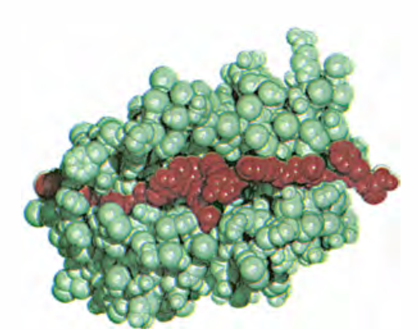
Townsend y Klaus Kärre han demostrado esa exigencia con notable acierto. Identificaron células mutantes que sólo poseían un 5 % del número estándar de moléculas MHC de clase I en su superficie, aun cuando sintetizaran cadenas pesadas y cadenas ligeras β2m en cantidades normales. Las cadenas no se plegaban y quedaban atrapadas en el retículo endoplasmático. Al añadir los péptidos adecuados a estas células, las cadenas se plegaban correctamente y las células expresaban niveles más normales de moléculas de clase I. Así pues, los péptidos estabilizan las interacciones de las cadenas pesadas y ligeras, actuando en muchos sentidos como una tercera subunidad de la molécula de clase I.

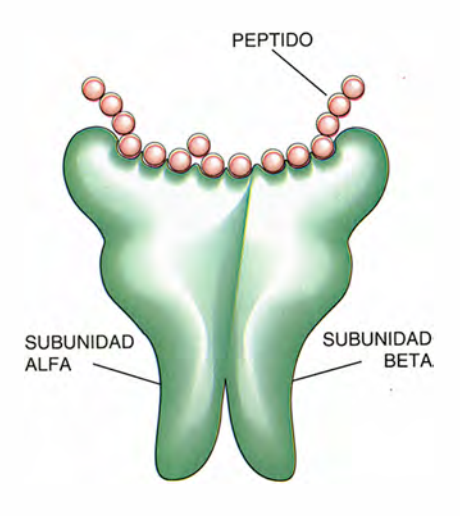
La identificación de células mutantes, como las estudiadas por Townsend y Kärre, en la que los péptidos no se asocian con las moléculas MHC de clase I, estimuló la investigación de ese fracaso. En 1990 cuatro grupos

descubrieron simultáneamente dos genes del MHC que codifican proteínas de transporte, polipéptidos de una familia numerosa de moléculas semejantes que facilitan el transporte a través de membranas en diversos organismos. Y se cree así que las nuevas proteínas asociadas con el MHC transportan péptidos desde el citoplasma hasta el retículo endoplasmático. De ahí que le hayan impuesto a la molécula el nombre de TAP (del inglés *Transporter associated with Antigen Processing*, transportador asociado con el procesado de antígenos), codificada por genes del mismo nombre.

Todas las líneas de células mutantes que presentan un procesado defectuoso de antígenos poseen algún defecto en los genes TAP. Otros experimentos apoyan también la hipótesis, incluida una demostración directa de que las vesículas membranosas que contienen TAP catalizan el transporte de péptidos pequeños.







5. MOLECULAS MHC DE CLASE II, dotadas de subunidades α y β de un tamaño casi idéntico (*abajo*). Estas moléculas retienen también los péptidos en una hendidura (*centro*), pero los enlaces que los ligan se hallan ahora en la mitad del surco (*arriba*). Los péptidos unidos a las moléculas de clase II suelen ser más largos y variables en su longitud que los asociados con los de clase I.

¿Cómo transporta el producto del TAP estos péptidos? Por lo que se desprende de algunos datos circunstanciales, intervendrían los proteasomas. Estos complejos enzimáticos son estructuras cilíndricas de gran tamaño que se encuentran en muchos compartimentos de la célula. Amalgama de diversas proteasas, parecen constituir el mecanismo principal de la célula para degradar proteínas que ya cumplieron su función, estén alteradas o se plegaron de manera incorrecta.

John J. Monaco ha demostrado que dos subunidades frecuentes en los proteasomas están codificadas por genes del MHC inmediatamente adyacentes a los del TAP. Sólo un 10 % de los proteasomas celulares suelen contener estas subunidades. Pero si se expone una célula al interferón gamma, una linfocina liberada durante las respuestas inmunitarias, aumenta la expresión celular de estas unidades y se asocian con más proteasomas. (La expresión de moléculas MHC y de TAP también aumenta en esa célula.)

Según han comprobado Kenneth L. Rock y Alfred. L. Goldberg, la inclusión de tales subunidades en un proteasoma provoca que éste produzca péptidos que terminan en aminoácidos básicos o hidrófobos, es decir, los tipos a los que se unen la mayoría de las moléculas de clase I. Se desconoce si las dos subunidades alteran la longitud de los péptidos producidos, para dar el tamaño que requieren las moléculas de clase I. Sin embargo, resulta tentador pensar que los proteasomas degraden las proteínas sintetizadas en el citoplasma y que sea el TAP el que se encargue de su transporte al retículo endoplasmático, donde pueden unirse a moléculas MHC de clase I.

Muchas células mutantes que carecen de uno o ambos componentes del TAP siguen expresando cantidades elevadas de algunas formas de moléculas MHC de clase I en su superficie. Henderson y Michel han descubierto que, en estas células, los péptidos asociados con las moléculas de clase I parecen proceder de secuencias señal de proteínas celulares. Las secuencias señal son una característica del extremo amino terminal de proteínas recién terminadas, que habrán de encaminarse hacia la superficie o hacia compartimentos celulares internos. Cuando los ribosomas sintetizan las proteínas, estas secuencias aseguran que los ribosomas se adherirán al retículo endoplasmático antes de que se haya completado la proteína. En efecto, las secuencias señal ayudan a dirigir las nuevas proteínas hasta su destino final.

A medida que la proteína penetra en el retículo endoplasmático, una enzima corta la secuencia señal de su extremo de cabeza. Liberada, la secuencia señal constituye una fuente de péptidos prestos para asociarse con moléculas de clase I, supliendo con ello los defectos del procesado de antígenos en la célula mutante. Al menos dos péptidos reconocidos por los linfocitos *T* proceden de secuencias señal, lo que revela el interés potencial de esta vía alternativa de procesado de antígeno.

Las moléculas MHC de clase I y de clase II se ensamblan en el interior del retículo endoplasmático. ¿Por qué no se unen, pues, a los mismos péptidos? Parte de la razón podría deberse a que los péptidos transportados hasta el retículo endoplasmático por la TAP carecieran de los rasgos estructurales que les capacitasen para unirse de manera estable a las moléculas de clase II.

Quizá la explicación más convincente, sin embargo, sea la de que, después de su síntesis, las subunidades de clase II se asocian con una tercera molécula, la cadena invariable (o Ii). La cadena invariable evita que los péptidos se unan a las moléculas de clase II bloqueando la unión del péptido o manteniendo las moléculas de clase II en un estado

parcialmente desplegado. También encarrila las moléculas MHC de clase II hacia la superficie celular por una vía no utilizada por las moléculas de clase I y la mayoría de las otras proteínas de la superficie de la membrana: a través del aparato de Golgi y hacia el interior de los endosomas.

Los endosomas son vesículas membranosas formadas por invaginaciones de la membrana de la superficie celular. Contienen a menudo proteínas de superficie acompañadas de sus ligandos (las moléculas a las que se unen). Conforme se desplazan por la célula, el interior de los endosomas se torna ácido, y acumulan proteasas que degradan muchas de las proteínas de superficie encapsuladas y sus ligandos. Por último, los endosomas se reciclan en la membrana de la superficie, con la que se funden, y devuelven su contenido a la superficie.

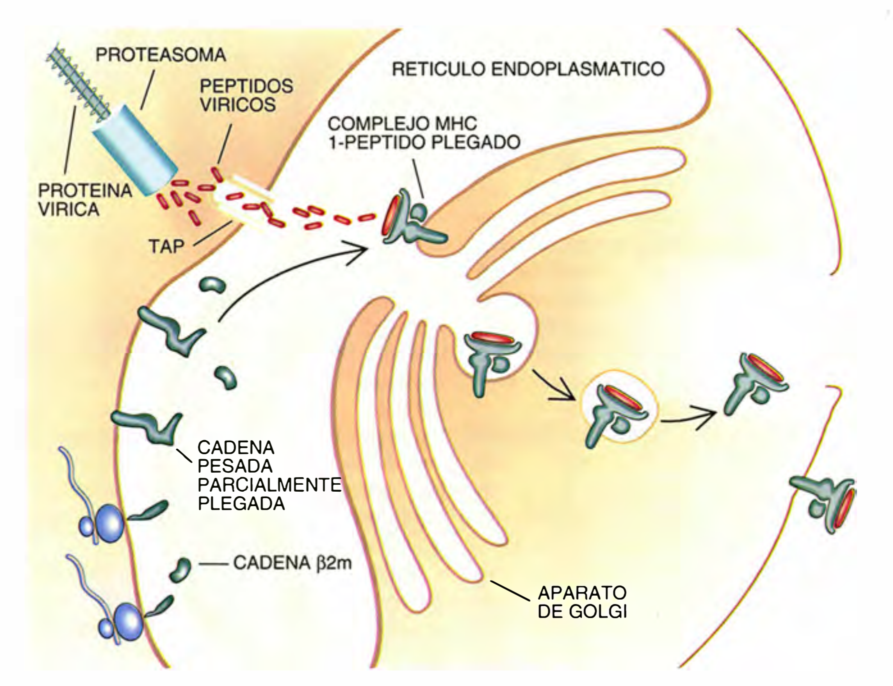
Peter Cresswell observó que, cuando los complejos de clase II con Ii se trasladan al interior de los endosomas, se detiene el movimiento de las vesículas hacia la superficie por un período de hasta seis horas. Durante ese intervalo, las proteasas endosómicas digieren la cadena invariable, que deja en libertad a las moléculas de clase II para que se unan a otros péptidos en la vesícula. Muchos de esos péptidos derivan, por tanto, de fuentes extracelulares. Finalmente, los complejos de clase II y péptido avanzan hacia la superficie celular.

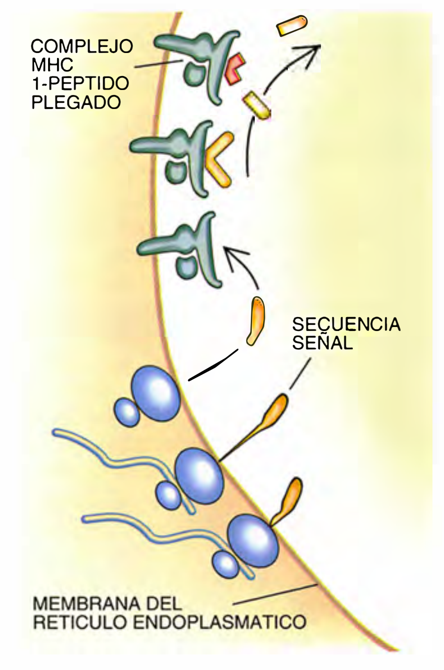
Otro punto interesante acerca de la formación de los complejos de moléculas de clase II y péptido se descubrió al examinar ciertas células mutantes conseguidas por Elizabeth D. Mullins y Donald A. Pious. En la superficie de estas células, las moléculas de clase II tienen un aspecto desmadejado, desnaturalizado. El aspecto y comportamiento de estas moléculas se asemeja a las moléculas de clase II recién sintetizadas en el retículo endoplasmático. Cabría suponer que estas moléculas desmadejadas de la superficie carecieran también de un péptido estabilizador. Sin embargo, el aislamiento de las moléculas a partir de las células mutantes ha rechazado esa sospecha: las moléculas desmadejadas se unen a un grupo de péptidos derivados de una región pequeña de la cadena invariable. Esos péptidos reciben el nombre de CLIP (del inglés *Class-II-associated invariant Chain Peptides*, péptidos de la cadena invariable asociados con las moléculas de clase II).

La mutación parece bloquear la capacidad de las moléculas MHC de clase II para asociarse con péptidos distintos de los de la cadena invariable. Mullins y Pious demostraron que el defecto de estas células afectaba a una nueva molécula, la DM, cuya estructura guarda relación con las moléculas de la clase II, aunque es distinta de ellas.

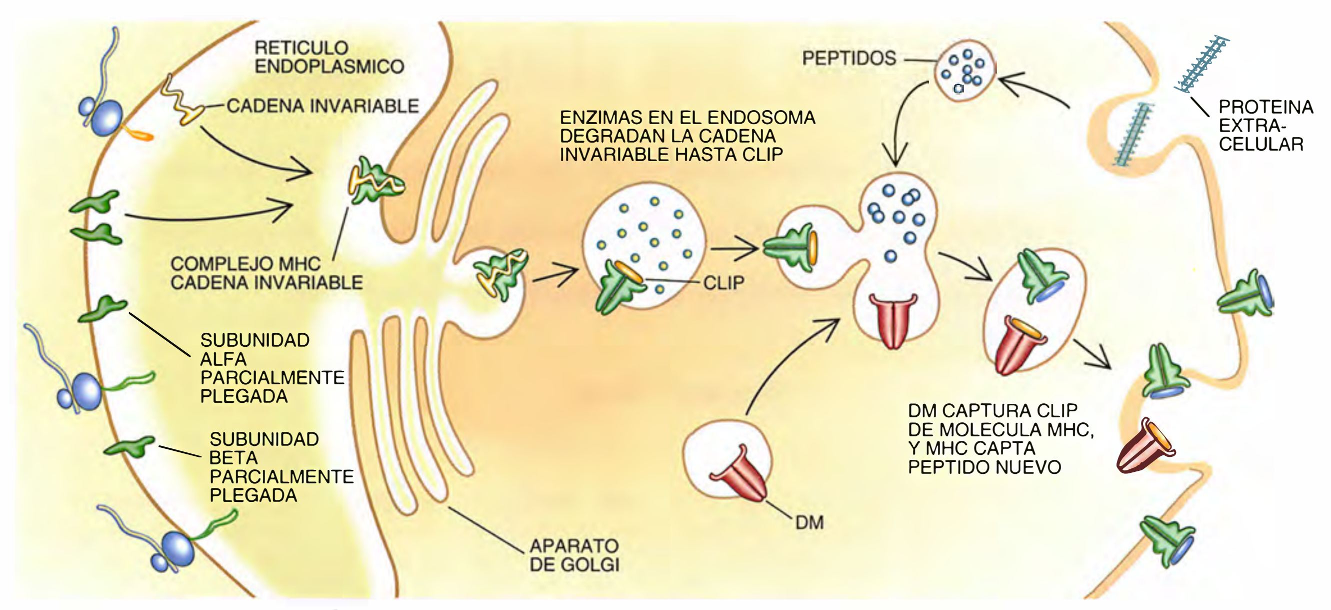
Desconocemos la función precisa de los CLIP y de la DM en la vía normal de procesado de las moléculas de clase II. Tal vez, el CLIP forme parte de la cadena invariable que físicamente ocupa la hendidura de la molécula de clase II donde se une el péptido, o al menos altere la estructura de la molécula de clase II para evitar la unión de otros péptidos. Una vez degradada la cadena invariable en el endosoma, el CLIP permanece asociada a la molécula de clase II hasta que la DM lo separa.

Los mecanismos de procesado del antígeno producen una muestra representativa de péptidos a partir de la amplia gama de proteínas que la célula fabrica e ingiere. La presentación de estos péptidos con moléculas MHC le permite al sistema inmunitario identificar y destruir las células que han alojado agentes infecciosos o que sean anormales por otros motivos. Las moléculas MHC han de estar capacitadas para presentar muchos péptidos foráneos y hacerlo de suerte tal, que el complejo tenga un aspecto diferente del que ofrecería con un péptido procedente de la célula hospedadora. En esa exigencia reside, a buen seguro, la razón de que los individuos expresen formas diversas de moléculas MHC de clase I y II y que la población acumule centenares de ellas: unas son más idóneas que otras para enlazarse con péptidos procedentes de patógenos específicos.





6. VIA de los antígenos de clase I (*izquierda*). Comienza con proteínas intracelulares, así las procedentes de infecciones víricas, que los proteasomas degradan en péptidos; la TAP, proteína transportadora, los lleva luego hasta el interior del retículo endoplasmático. Aquí, los péptidos y las subunidades de clase I parcialmente plegadas se asocian y crean un complejo MHC-péptido plegado, que se encamina hacia el aparato de Golgi y de allí a la superficie celular. En una variante de esta vía, descubierta por el autor y sus colaboradores (*derecha*), los péptidos pueden tener su origen en las secuencias señal escindidas del extremo inicial de las proteínas celulares que se ensamblan en el retículo endoplasmático.



7. VIA DE LOS ANTIGENOS DE CLASE II. Comienza con la unión de subunidades del MHC a una molécula de la cadena invariable. Tras el paso de ese complejo por el aparato de Golgi, la cadena invariable queda reducida a un péptido menor, el CLIP. En el interior de las vesículas endosómicas, una molécula DM arranca el CLIP del complejo MHC; queda así libre la molécula del MHC para unirse con péptidos derivados de proteínas extracelulares.

Comienzan a menudear los ejemplos reales de la significación del polimorfismo del MHC. No hace muchos años, el grupo de Adrian Hill obtenía datos relativos a la sensibilidad humana hacia la malaria. Se ha visto que ésta varía con la expresión de ciertas moléculas MHC de clase I. Las formas que confieren mayor resistencia abundan entre los habitantes de lugares donde la malaria está muy extendida, de acuerdo con lo que dictaría la selección natural.

Ciertos patógenos han aprendido a enfrentarse con el sistema de procesado de antígenos. Hay virus, por ejemplo, que eliminan la expresión de moléculas MHC durante las primeras etapas de una infección. Muchas clases de adenovirus fabrican una molécula que se une a moléculas de clase I recién sintetizadas en el retículo endoplasmático y evita su expresión en la superficie celular. Otros adenovirus sintetizan una molécula que bloquea la expresión del gen de clase I. También acaba de describirse el bloqueo de la expresión en la superficie de moléculas MHC de clase I en el caso de citomegalovirus y virus del herpes simple. Pero esas excepciones no invalidan la eficacia general del procesado del antígeno en el control inmunitario de las infecciones.

¿Qué papel cumple el procesado del antígeno en el control del cáncer? Puesto que muchos tumores expresan proteínas mutadas, el sistema inmunitario podría buscar péptidos extraídos de esas proteínas a la manera de indicadores de la transformación sufrida por una célula. Se han identificado tumores en los que está mermada la expresión de moléculas MHC de clase I. La estimulación experimental de la expresión de MHC facilita al sistema inmunitario el control de esos tumores. Observaciones recientes sugieren que determinadas células tumorales pueden relajar su expresión de TAP, para evitar quizás el reconocimiento por los linfocitos *T*.

Empieza a desvelarse la naturaleza de los péptidos reconocibles por linfocitos *T* específicos de tumores. El equipo de Thierry Boon ha estudiado los linfocitos *T* que reconocen las células del melanoma en el hombre. Han demostrado que uno de los objetivos a abatir por las células *T* sería un grupo de péptidos de MAGE-1, proteína que se expresa en diversos tumores y resulta casi indetectable en el tejido normal. Boon, Steven A. Rosenberg y mi equipo hemos identificado también péptidos antigénicos que proceden de tres proteínas que expresan tanto los melanocitos normales como las células tumorales del melanoma.

Sugieren esos resultados que la eficacia de la inmunidad antitumoral podría estar limitada, en parte, por la disponibilidad de péptidos diana insólitos en las células tumorales. Para reforzar la inmunidad antitumoral necesitaremos identificar complejos de clase I y péptido en células tumorales que las células *T* reconozcan, así como desarrollar vías encaminadas a incrementar su inmunogenicidad.

Ocurre que la potencia del sistema de procesado de antígenos actúa a veces en contra del organismo. Se ha comprobado que la expresión de ciertas moléculas MHC de clase II está vinculada a muchas enfermedades autoinmunes, como la diabetes juvenil y la artritis reumatoide, en que el sistema inmunitario ataca los tejidos propios. Estas moléculas MHC muy posiblemente presenten péptidos provenientes del propio organismo, precipitando la respuesta inmunitaria. El sistema inmunitario dispone de mecanismos que evitan las configuraciones que darían lugar a respuestas destructoras, o las detienen a tiempo; ignoramos por qué fallan en tales casos.

La vinculación entre presentación de péptidos propios y foráneos con el desarrollo de dichas condiciones constituye un reto para los inmunólogos. Se ha de conseguir bloquear la presentación de antígenos que exacerban las enfermedades autoinmunes, o reforzar la labor de procesado para que denuncien la presencia de una infección o tumor.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

NATURALLY PROCESSED PEPTIDES. Dirigido por Alessandro Sette. Karger, 1993.

ANTIGENIC PEPTIDE BINDING BY CLASS I AND CLASS II HISTOCOMPATIBILITY PROTEINS. Lawrence J. Stem y Don C. Wiley en *Structure*, vol. 2, n.º 4, págs. 245-251; 15 de abril de 1994.

STRUCTURE OF PEPTIDES ASSOCIATED WITH CLASS I AND CLASS II MHC MOLECULES. Victor H. Engelhard en *Annual Review of Immunology*, vol. 12, págs. 181-207; 1994.

Origen de los dinosaurios

Los primitivos dinosaurios carnívoros incrementaron muy pronto el tamaño corporal y se multiplicaron, coevolucionando con corpulentos tetrápodos herbívoros de número muy superior

Fernando E. Novas

Los dinosaurios más antiguos y mejor documentados que se conocen se han descubierto en el oeste de Argentina, en rocas de la Formación Ischigualasto, de principios del Triásico tardío, hace aproximadamente 228 millones de años. De estos estratos geológicos provienen tres especies consideradas decisivas en la interpretación del curso evolutivo de los dinosaurios: *Herrerasaurus ischigualastensis*, *Pisanosaurus mertii* y *Eoraptor lunensis*.

A escasos kilómetros de los afloramientos ischigualastenses existe otro importante yacimiento, donde se hallaron los representantes de las etapas evolutivas previas a la aparición de los verdaderos dinosaurios. Nos referimos a la Formación Los Chañares del Triásico medio, cuya edad se estima en 235 millones de años. De ella proceden restos muy completos de los reptiles *Lagerpeton chanarensis*, *Lagosuchus talampayensis* y *Pseudolagosuchus major*.

Esas seis especies constituyen, en efecto, el núcleo principal sobre el cual se elaboran las hipótesis acerca de las transformaciones morfológicas que condujeron a la aparición de los dinosaurios.

Para reconstruir la filogenia y especular sobre las circunstancias que rodearon sus orígenes, tendremos que analizar la anatomía de los primitivos representantes del grupo, hilvanar sus relaciones de parentesco y cribar el registro fósil de tetrápodos (anfibios, reptiles y sinápsidos) de las formaciones Los Chañares e Ischigualasto. Se trata, en definitiva, de responder a las tres cuestiones fundamentales que atañen al origen de los dinosaurios: ¿Conforman un grupo monofilético? ¿Cuáles son las relaciones de parentesco entre los principales subgrupos dinosaurianos? ¿De qué manera llegaron a convertirse en reptiles dominantes de las comunidades de tetrápodos terrestres?

Fue Richard Owen quien en 1841 reconocía Dinosauria como un grupo de reptiles terrestres, de enorme tamaño, que exhibían rasgos más avanzados que los reptiles actuales en la construcción de la columna vertebral y miembros posteriores. A partir de esa fecha, los descubrimientos de dinosaurios se multiplicaron y comenzó a hacerse evidente que Dinosauria no representaba un grupo homogéneo, sino un taxón muy variopinto y con amplia diversidad de adaptaciones.

Los paleontólogos, dispuestos a poner orden en la diversidad, esbozaron numerosas clasificaciones. En 1887 Harry Seeley se fijó en la morfología de la pelvis para dividir los dinosaurios en dos unidades taxonómicas diferentes: Saurischia, con el pubis orientado anteroventralmente, y Ornithischia, con el pubis proyectado posteroventralmente. Con tan señalada disparidad pelviana, Seeley no halló razones para considerar linajes emparentados a saurisquios y ornitisquios.

Los rasgos que Owen había reconocido para caracterizar a sus Dinosauria fueron reinterpretados por Seeley como meros parecidos superficiales, resultado de semejanzas funcionales en la postura de los miembros posteriores de saurisquios y ornitisquios. A lo largo del siglo XX la idea de Seeley fue ganando aceptación; y así, el nombre Dinosauria pasó a designar una asociación polifilética de reptiles. Saurisquios y ornitisquios estaban tan relacionados entre sí como con otros reptiles arcosaurios, es decir, cocodrilos, pterosaurios (reptiles voladores) y una extensa variedad de tecodontes (arcosaurios primitivos del Triásico). Los orígenes de saurisquios y ornitisquios se buscaron, por tanto, en ancestros diferentes.

Robert Bakker y Peter Galton sacudieron en 1974 la hipótesis vigente al afirmar que todos los dinosaurios compartían un ancestro común. Contrariamente a Seeley, cuyas observaciones estuvieron dirigidas a poner el acento en las diferencias anatómicas entre saurisquios y ornitisquios, Bakker y Galton prestaron atención en las semejanzas compartidas por dichos grupos y parientes más próximos. Observaron que saurisquios y ornitis-



1. LA FORMACION ISCHIGUALASTO tiene sus mejores afloramientos en la Hoyada de Ischigualasto, también conocida como Valle de la Luna, provincia de San Juan. Conforma una unidad sedimentaria de aproximadamente 600 metros de espesor, formada por tobas arcillosas que alternan con areniscas de tonalidades grises y amarillentas, depositadas por la acción de ríos y lagos a principios del Triásico tardío. La Formación Ischigualasto atesora una rica variedad de vegetales y vertebrados fósiles, estos últimos representados por peces, anfibios laberintodontes, sinápsidos, rincosaurios y arcosaurios.

FERNANDO E. NOVAS se formó en la Universidad Nacional de La Plata. Adscrito al Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas, se halla vinculado al Museo Argentino de Ciencias Naturales de Buenos Aires, donde estudia la anatomía y filogenia de dinosaurios.

quios fueron bípedos en sus inicios, y que sus patas traseras adoptaban una postura vertical, rasgos que se encontraban ausentes en otros reptiles arcosaurios. Los caracteres que listaron en apoyo de su hipótesis incluían: acetábulo perforado, cabeza femoral diferenciada del resto del hueso, fíbula reducida, tarso mesotarsal y postura digitígrada.

Un año después, en 1975, José Bonaparte, del Museo Argentino de Ciencias Naturales, presentó un estudio pormenorizado del pequeño *Lagosuchus*; en él reconocía numerosos rasgos dinosaurianos que permitieron cubrir parte del hiato morfológico existente entre los dinosaurios, mayoritariamente bípedos, y los primitivos arcosaurios, cuadrúpedos. *Lagosuchus* manifestaba un estrecho parentesco con los dinosaurios.

Si bien estos nuevos hallazgos e interpretaciones fueron decisivos para un mejor entendimiento de los orígenes dinosaurianos, no corroboraban la monofilia de los Dinosauria.

Jacques Gauthier, de la Academia de Ciencias de California, avanzó bastante en el esclarecimiento de la filogenia de los dinosaurios. Su análisis permitió visualizar la secuencia de aparición de adaptaciones novedosas, al tiempo que descartó lo que otros autores consideraban rasgos distintivos de Dinosauria.

Durante el desarrollo de mi tesis doctoral tuve oportunidad de estudiar de cerca al *Lagosuchus* y de compararlo con dinosaurios arcaicos. Distinguí varios rasgos que éste compartía con saurisquios y ornitisquios, así como aquellos caracteres que diferencian a los Dinosauria de los restantes arcosaurios. *Lagosuchus* y Dinosauria presentan en común una fosa trocantérica en la cara proximal de la cabeza femoral, que articulaba y deslizaba sobre un prominente antitrocánter pélvico ubicado en el sector posterior del acetábulo. *Lagosuchus* y Dinosauria también compartían el desarrollo, en el extremo proximal de la tibia, de una cresta de contorno rectangular (la cresta cnemial) proyectada hacia adelante y en la cual se insertaban músculos protractores del miembro posterior. Estos y otros rasgos, ausentes en los restantes arcosaurios, corroboraban las relaciones de parentesco entre *Lagosuchus* y los dinosaurios, por lo que consideré oportuno agruparlos dentro de un taxón al que denominé Dinosauriformes.

Faltaba identificar aún cuáles eran los rasgos que exclusivamente compartieran saurisquios y ornitisquios, y que sirvieran de soporte de la monofilia dinosauriana. En verdad, varias de las modificaciones citadas ya por Bakker, Galton, Bonaparte y Gauthier no eran exclusivas de los dinosaurios: con excepción de la perforación acetabular, la mayoría de los rasgos se encuentran presentes también en los pterosaurios *Lagerpeton*, *Lagosuchus* y *Pseudolagosuchus*.

Para sustentar la hipótesis de monofiletismo es necesario reconocer apomorfías (rasgos novedosos) compartidas por saurisquios y ornitisquios, y ausentes en *Lagosuchus* y grupos emparentados más inmediatos. Se considera que estas apomorfías evolucionaron en el ancestro común de Saurischia y Ornithischia, es decir, en una especie ancestral que también fue dinosaurio. Para que Dinosauria sea monofilético no sólo debe incluir a su especie ancestral, sino también a todos sus descendientes, las aves. Estas últimas no son otra cosa que dinosaurios vivientes.

En la comparación de representantes primitivos de saurisquios y ornitisquios con otros arcosaurios (*Pseudolagosuchus, Lagosuchus, Lagerpeton*, Pterosauria) distinguí diversos rasgos apomórficos de Dinosauria, que, según se cree, estuvieron también presentes en el hipotético dinosaurio an-





2. *LAGOSUCHUS TALAMPAYENSIS*, descubierto en los afloramientos de mediados del Triásico medio de la Formación Los Chañares, en la provincia de La Rioja. *Lagosuchus*, del que se conocen cuatro ejemplares, fue un grácil arcosaurio insectívoro de aproximadamente 50 centímetros de largo. Constituye uno de los primeros vertebrados que adquirieron el bipedismo y el digitigradismo, adaptaciones que hoy día son retenidas por los dinosaurios vivientes, las aves.

cestral. Según mi interpretación, en ese antepasado común se produjeron las siguientes transformaciones anatómicas: los músculos pseudotemporales sobrepasaron el perímetro de las aberturas supratemporales invadiendo parcialmente la superficie dorsal de los huesos frontales, aparejando un incremento del poder de cierre de las mandíbulas. Las vértebras cervicales manifestaron una mayor inclinación de las caras articulares, exagerando aún más el contorno paralelográmico de los cuerpos vertebrales, dando por resultado una postura más sigmoidea del cuello; a semejanza de las aves actuales, la cabeza de los dinosaurios primitivos se mantenía elevada con respecto al resto del cuerpo. La columna vertebral robusteció sus contactos con las caderas al incorporar al sacro un tercer segmento, proveniente de las vértebras dorsales; no sólo los iliones parecen haberse expandido hacia adelante y atrás para albergar este nuevo segmento vertebral, sino que las dos vértebras sacras primordiales se acortaron también para ceder espacio a la nueva vértebra.

Pero las modificaciones más significativas que evolucionaron a partir del dinosaurio ancestral se concentraron en el aparato locomotor. A diferencia del *Lagosuchus* y otros arcosaurios, los pubis de los dinosaurios se alargaron, tendiendo a igualar la longitud del fémur, mejorando el rendimiento de músculos aductores y protractores de los miembros posteriores. En el margen posteroventral del ilion se desarrolló una fosa donde tomaba origen el músculo *caudifemoralis brevis*, un fuerte retractor femoral. El aspecto de la cabeza femoral, de contorno rectangular y proyectada anteromedialmente, indica que el movimiento del fémur se restringió a un plano anteroposterior, de manera que el área del acetábulo que permaneció osificada fue aquella donde la cabeza femoral se deslizaba activamente. En consecuencia, un amplio sector central del acetábulo (que no transmitía fuerzas hacia el fémur) dejó de osificarse. Por su parte, encastres más firmes de la tibia y fíbula con el astrágalo y el calcáneo, respectivamente, restringieron los movimientos del pie en un plano anteroposterior.

Los dinosaurios y sus más cercanos parientes (pterosaurios, *Lagerpeton*, *Lagosuchus*) constituyeron uno de los linajes que por vez primera en la historia de los vertebrados adquirieron postura y andar bípedo y digitígrado. Las patas de los dinosaurios contrastan morfológica y funcionalmente con las patas de los reptiles actuales, asemejándose más a la de las aves. Esto apoya la idea según la cual los dinosaurios fueron animales de desplazamientos más rápidos y de períodos de actividad más intensos y prolongados que los reptiles actuales.

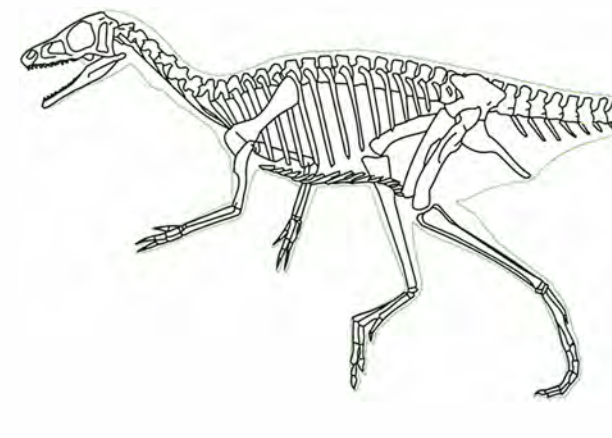
Lo anterior no prueba que los dinosaurios primitivos fueran endotermos homeotermos, esto es, reguladores de la temperatura corporal por mecanismos internos; pero tampoco hay razones para considerar a los primeros dinosaurios como típicos reptiles de escasa actividad metabólica. Así como la adquisición de novedades adaptativas en el esqueleto ha sido paulatina y escalonada, es probable que la aparición de novedades fisiológicas aconteciera de la misma forma.

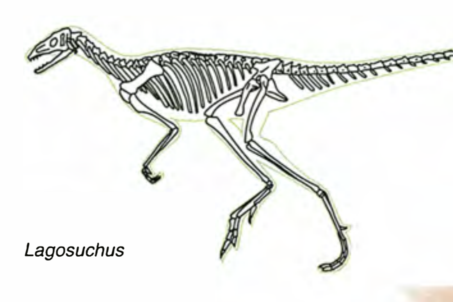
A partir de un ancestro común como el descrito se diferenciaron las dos agrupaciones principales de dinosaurios: Saurischia y Ornithischia. Los ornitisquios fueron herbívoros caracterizados por adaptaciones en el aparato masticador tales como la presencia de un hueso predentario, el desplazamiento hacia abajo del cóndilo mandibular respecto a la serie dentaria, y la individualización de corona y raíz en los dientes. Las profundas modificaciones que los ornitisquios exhibieron en la pelvis probablemente se relacionaron con un mayor aprovechamiento del material vegetal: según Peter Galton la torsión posteroventral del pubis, paralelamente al isquion, estaría correlacionada con el alargamiento del intestino. Saurischia constituye un grupo integrado por dos linajes principales: Sauropodomorpha, herbívoros corpulentos de hábitos bípedos o cuadrúpedos con cuello alargado y cabeza pequeña, y Theropoda, cursoriales, obligatoriamente bípedos, y de hábitos mayoritariamente depredadores.

Entre los ornistiquios, *Pisanosaurus* es el más antiguo conocido. Sus rasgos avanzados más sobresalientes se observan en el aparato masticador, provisto de “mejillas” resultantes del desplazamiento lingual de la hilera dentaria respecto a la superficie lateral de los huesos maxilar y dentario. Esto sugiere que *Pisanosaurus* poseía labios que impedían la pérdida del alimento por los lados de la boca. Los dientes son cilíndricos y forman una superficie de desgaste continua que debió de estar adaptada para masticar material vegetal fibroso.

Durante gran parte del Triásico prosperaron las coristopermas (*Dicroidium* y otros taxones afines), helechos de aspecto arbustivo y arborescente que habrían conformado parte sustancial de la dieta de *Pisanosaurus*. Los miembros posteriores, en cambio, exhiben rasgos primitivos. Cabe, pues, inferir que *Pisanosaurus* ocupa una posición basal dentro de Ornithischia, y que los caracteres derivados de las mandíbulas los adquiriesen, por convergencia, ornitisquios más avanzados. Los huesos pelvianos no aclaran si el pubis de *Pisanosaurus*

3. EN EL LINAJE de los dinosauriformes que condujo a la aparición de los dinosaurios se manifestaron diversas modificaciones anatómicas que incluyen aumento del tamaño corporal, incremento de la robustez de los huesos del esqueleto, remodelación de las articulaciones de varios huesos craneanos, vértebras del cuello, caderas y miembros posteriores, como también el desarrollo de nuevas estructuras óseas relacionadas con un incremento del volumen y complejidad del sistema muscular. De acuerdo con los datos disponibles, el dinosaurio ancestral sería un animal pequeño (50-100 centímetros de longitud), ágil, bípedo y de hábitos cursoriales.





Lagosuchus

DINOSAURIA

DINOSAURIFORMES

PTEROSAURIA

se orienta posteroventralmente (como en los restantes ornitisquios) o si se dirige hacia adelante (como en saurisquios y arcosaurios más primitivos).

Sin embargo, la presencia de *Pisanosaurus* en la Formación Ischigualasto indica que los ornitisquios transformaron rápidamente su aparato masticador, mientras que el locomotor retuvo una condición semejante a la de *Lagosuchus* y *Pseudolagosuchus*.

Herrerasaurus, así denominado en honor de Victorino Herrera, es uno de los dinosaurios arcaicos mejor documentados. Junto con su cercano pariente *Staurikosaurus*, de la Formación Santa María, del sureste de Brasil, representan un peculiar linaje de dinosaurios cazadores, los Herrerasauridae. *Herrerasaurus*, *Staurikosaurus* y *Eoraptor* son los representantes más antiguos de Saurischia.

Por largo tiempo la orientación anteroventral del pubis sirvió como carácter necesario y suficiente para incluir a Herrerasauridae dentro de Saurischia. Sin embargo, la presencia de rasgos primitivos (similares a *Lagosuchus*) extrañamente mezclados con caracteres avanzados desconcertó a los investigadores.

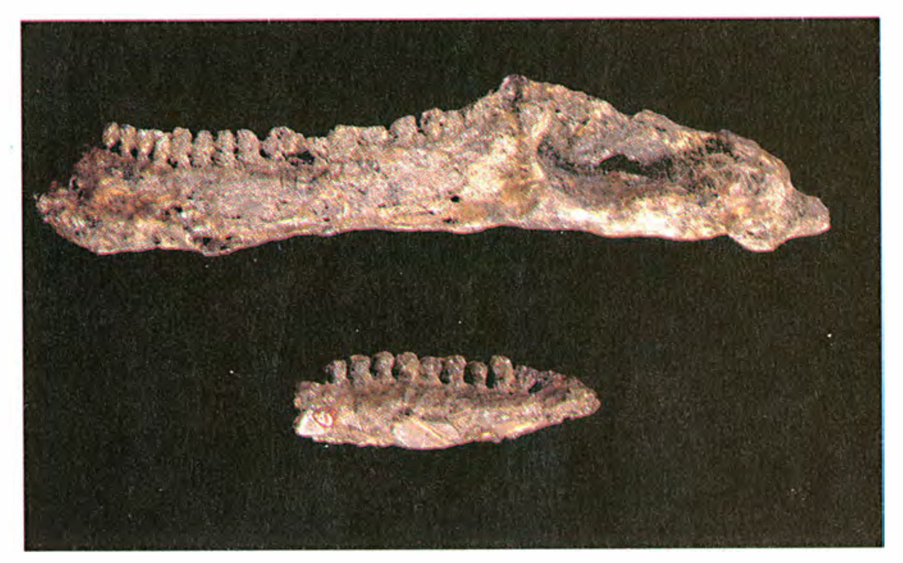
A partir de los estudios de Gauthier, comenzó a tomar cuerpo la idea según la cual los herrerasaurios no formaban parte del carril principal de la evolución dinosauriana, sino que representaban el grupo hermano del linaje conformado por saurisquios y ornitisquios, es decir, los verdaderos dinosaurios.

En 1992 di a conocer lo que creí eran pruebas sólidas de esta hipótesis: observé que el sacro de *Herrerasaurus* constaba sólo de dos segmentos vertebrales, el ilion carecía de cuenca para insertar el músculo *caudifemoralis brevis*, el fémur retuvo una fuerte prominencia (repisa trocantérica) en la cara lateral del sector proximal, a la vez que el trocánter menor estaba débilmente marcado. Todos esos rasgos de *Herrerasaurus* eran muy semejantes a la condición presente en *Lagosuchus* y *Pseudolagosuchus*, a la vez que distintos de los restantes dinosaurios; en éstos se cuentan tres vértebras sacras como mínimo, el ilion presenta cuenca para el músculo caudifemoralis muy amplia, la repisa trocantérica está ausente en la mayoría de ellos y el trocánter menor es más prominente.

Pero los especímenes de *Herrerasaurus* en los que basé mis investigaciones sólo disponían del sector posterior de la columna vertebral, pelvis y miembros posteriores, limitaciones que fueron superadas por nuevos hallazgos de esqueletos completos que incluían el cráneo y los miembros anteriores. El incremento de información me hizo cambiar de opinión y rechazar la hipótesis según la cual los Herrerasauridae constituían un primitivo linaje diferenciado con anterioridad al origen mismo de saurisquios y ornitisquios.

Descubrí que *Herrerasaurus* compartía con sauropodomorfos y terópodos numerosos caracteres que los unían dentro de Saurischia. En los saurisquios, la rama posterior del hueso yugal se bifurca para alojar el proceso anterior del hueso cuadrado-yugal, contacto laxo sugerente de un aumento del cinetismo craneano; las vértebras del tronco desarrollaron articulaciones intervertebrales accesorias (hipósfeno e hipantro), que restringieron la amplitud de los movimientos laterales de la espalda; el extremo distal del isquion formaba una barra de sección subtriangular, a diferencia de la mayoría de los reptiles, ornitisquios incluidos, en los cuales es transversalmente aplanado. No cabía la menor duda de que los herrerasáuridos eran saurisquios, interpretación a la que arribé, no ya sobre la base de similitudes plesiomórficas (primitivas) en la orientación del pubis, sino sobre caracteres apomórficos (derivados). Los rasgos avanzados indican que los herrerasáuridos no ocupan una posición ancestral respecto a otros dinosaurios, sino que constituyen un linaje que tuvo su esplendor a principios del Triásico tardío y que ya se encontraba bastante lejos del hipotético ancestro común del que descendieron todos los dinosaurios.

Pero en el curso del análisis me vi sorprendido por la presencia de varios rasgos muy avanzados en el cráneo y mano de *Herrerasaurus*, que sólo se presentan en los Theropoda. Así, en las mandíbulas los huesos dentario y esplenial se articulan sobre los huesos posdentarios (surangular, articular y prearticular), mediante una serie de complejos encastres que habrían per-





4. LOS ORNITISQUIOS fueron, durante sus inicios y hasta bien comenzada su carrera evolutiva, bípedos pequeños y de escaso número. *Pisanosaurus mertii*, de aproximadamente 1 metro de longitud, es un representante de las tempranas etapas de la evolución de estos dinosaurios estrictamente herbívoros. Sus mandíbulas, de construcción masiva, complejas y provistas de numerosos dientes cilíndricos, atestiguan que podía procesar material vegetal resistente, como frondes del helecho *Dicroidium* (*foto inferior*).

mitido movimientos en un plano vertical para un mejor acomodamiento de la boca al contorno de la presa.

Los miembros anteriores de *Herrerasaurus* representan la mitad del largo de los miembros posteriores y, por estar armados con garras recurvadas y puntiagudas, debían de intervenir activamente en la captura y despedazamiento de las presas. Las manos del *Herrerasaurus* son proporcionalmente esbeltas y caracterizadas por una fuerte atrofia de los dedos externos 4 y 5. Los dedos 1, 2 y 3, en cambio, son alargados y su morfología sugiere una elevada capacidad de movimientos, a la vez que actividades en las que era requerida la fuerza. Las garras son grandes, curvas, transversalmente comprimidas y terminadas en una punta lacerante.

En la cadera y en las vértebras de la cola existen particularidades que interpretamos relacionadas con la postura bípeda y la carrera: el pubis está expandido en su extremo distal, sitio donde se originaba el músculo *puboisquiofemoralis* que habría incrementado la capacidad para mover con mayor rapidez hacia adelante al fémur. Pero un incremento de velocidad en un animal bípedo debe ir acompañado por adaptaciones comprometidas con el mantenimiento del equilibrio. En efecto, las vértebras caudales distales encastran firmemente entre sí como resultado del alargamiento de las prezigapófisis, las que restringieron los movimientos ondulatorios laterales del sector distal de la cola. El extremo del apéndice caudal de los herrerasáuridos se desempeñaba a modo de estabilizador dinámico durante la marcha y la carrera.

La reconstrucción del árbol genealógico de los dinosaurios al que hemos arribado a través del análisis de la distribución de apomorfías muestra a los herrerasáuridos como un grupo basal de saurisquios terópodos. Ciertos caracteres que originalmente consideré primitivos cabe interpretarlos de distinta forma en el marco de esta nueva hipótesis: la presencia de sólo dos vértebras sacras y la ausencia de fosa para el músculo *caudifemoralis brevis* constituyen reversiones apomórficas, es decir, rasgos semejantes a la condición pre-dinosauriana que fueron readquiridos en la evolución de los herrerosaurios.

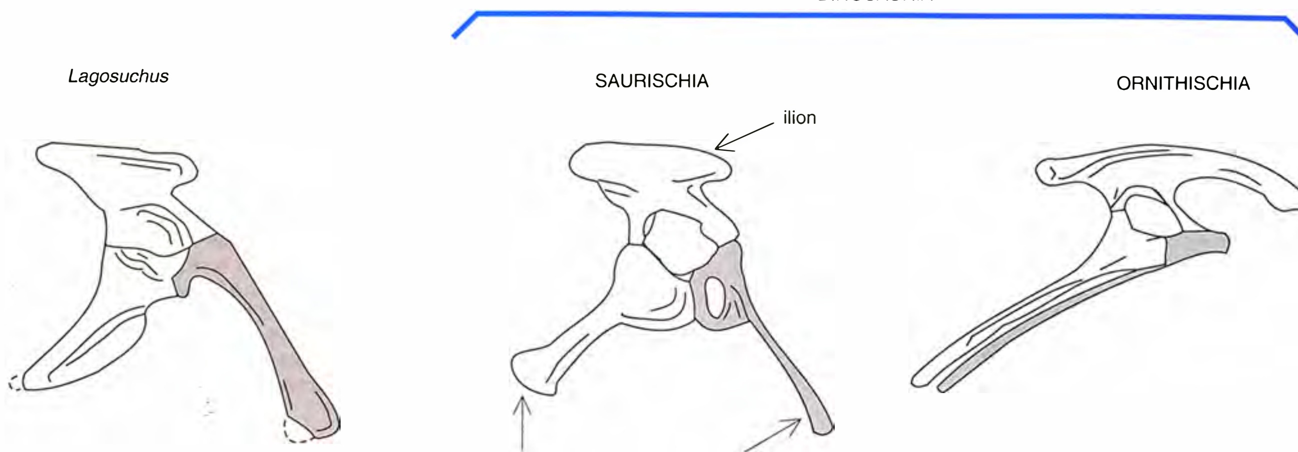
Los herrerosaurios no resultaron tan primitivos como parecía, sino que se trata de peculiares terópodos morfológicamente alejados del hipotético dinosaurio ancestral. En 1991 descubrimos en el Valle de la Luna un dinosaurio más primitivo que los herrerosaurios, aunque no tan cercano al antepasado común de todos los dinosaurios como algunos investigadores pretenden. Se trata del *Eoraptor lunensis*, de aproximadamente 1 metro de longitud, que aporta datos concernientes a las primeras etapas de la evolución de los saurisquios.

Eoraptor exhibe 15 transformaciones morfológicas —ausentes en el dinosaurio ancestral—, 10 de las cuales son diagnósticas de Saurischia, mientras que las cinco restantes lo son de Theropoda. Esta especie posee epipófisis prominentes y puntiagudas, húmero 50 por ciento del largo de la longitud femoral, metacarpos 1, 2 y 3 con profundas depresiones semilunares en sus extremos distales, y metacarpos 4 y 5 atrofiados, rasgos que comparte con los herrerasaurios y terópodos más avanzados.

Eoraptor es tan antiguo como *Herrerasaurus* y *Pisanosaurus*, y es *Staurikosaurus*, en verdad, el más antiguo de todos los dinosaurios conocidos. Por tanto, *Eoraptor* no puede catalogarse como un dinosaurio ancestral, sino como un primitivo representante de los saurisquios terópodos.

Staurikosaurus, Pisanosaurus y *Eoraptor* sugieren que las adaptaciones que diagnostican a Dinosauria, Ornithischia, Saurischia, Sauropomorpha y Theropoda, respectivamente, evolucionaron en criaturas del tamaño de una gallina o un pavo actuales, en momentos en que los dinosaurios no constituían el elemento dominante de las faunas de tetrápodos continentales. Con la probable excepción de Theropoda, la aparición de dichas novedades adaptativas no parece haber actuado de gatillo para propulsar a los dinosaurios a convertirse en los tetrápodos dominantes. Por el contrario, la abundancia numérica ocurrió millones de años después que aparecieran los rasgos osteológicos distintivos de cada agrupación dinosauriana.

Se ha dicho que el dominio que los dinosaurios alcanzaron a fines del Triásico (hace 215 millones) fue abrupto y se debió a una cuestión de suerte. Según Michael Benton, la radiación de los dinosaurios habría ocurrido en un ecospacio vacío, posteriormente a la extinción de varios grupos de tetrápodos. Ciertamente



5. SAURISQUIOS Y ORNITISQUIOS han venido diferenciándose en razón de la orientación del pubis. Si bien es cierto que la orientación posteroventral de este hueso constituye una clara sinapomorfía de los ornitisquios, no es correcto considerar a la proyección anteroventral del pubis como rasgo diagnóstico de Saurischia. En efecto, la orientación anteroventral del pubis se presenta en la mayoría de los arcosaurios (*Lagosuchus*), indicando que se trata de un rasgo plesiomórfico. No están en el pubis, sino en el cráneo, vértebras, mano e isquion los caracteres diagnósticos de Saurischia.

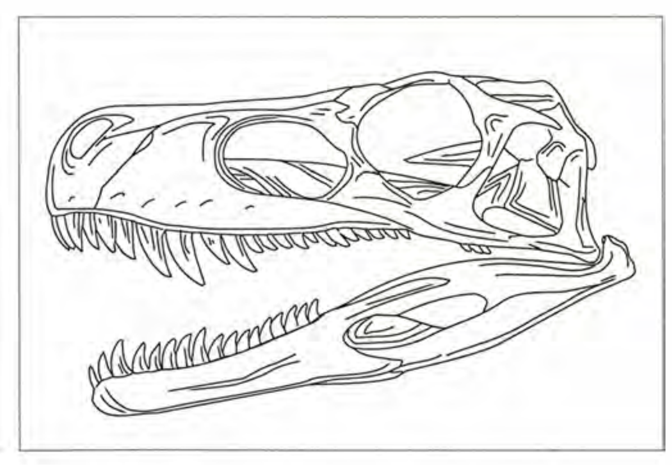
los dinosaurios no conformaban el grueso de la fauna ischigualastense: eran los rincosaurios y los sinápsidos traversodontes, herbívoros corpulentos de hasta tres metros de largo, los numéricamente dominantes.

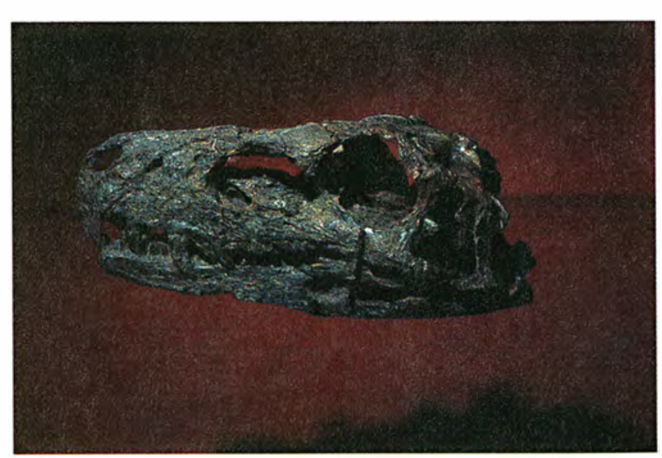
Tanto rincosaurios como traversodontes exhibieron características funcionales comunes, consistentes en el amplio desarrollo de músculos mandibulares relacionados con la masticación de alimentos coriáceos. En los rincosaurios el cráneo era corto y muy ancho en su sector posterior; robustas baterías dentarias estaban presentes en los maxilares, mientras que el hocico culminaba en un pico semejante al de los loros actuales. Probablemente, las baterías dentarias trituraban el alimento, mientras que el pico lo cortaba. Los traversodontes, en cambio, poseían denticiones diferenciadas en incisiviformes, caniniformes y molariformes; estos últimos con superficies de corte y desgaste. El desplazamiento lingual de la fila dentaria sugiere que los traversodontes tenían mejillas musculosas como en los mamíferos actuales, por lo que se supone que eran capaces de reubicar el alimento una y otra vez produciendo un paulatino desmenuzamiento del mismo en la cavidad bucal. Varios paleontólogos interpretan que la flora de *Dicroidium* brindaba abundante sustento a las manadas de estos arcaicos herbívoros.

Es en rocas de la Formación Los Colorados (de hace unos 220 millones de años), sobrepuestas a la Formación Ischigualasto, donde predominan ampliamente los dinosaurios sauropodomorfos, mientras que no hay rastro de rincosaurios ni de traversodontes.

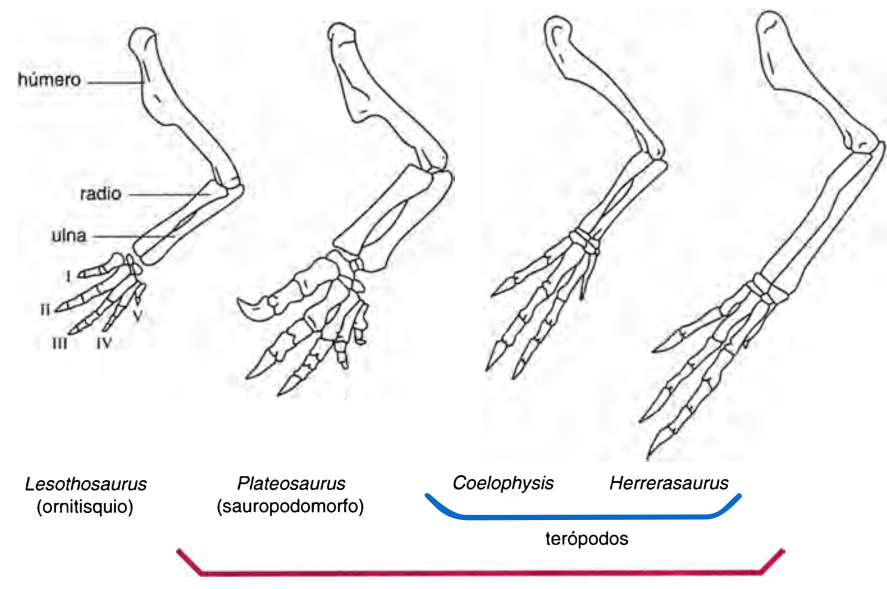
El modelo de evolución oportunista pareciera aplicarse con bastante lógica a los dinosaurios herbívoros, los cuales incrementaron el tamaño corporal y multiplicaron su número con posterioridad a la extinción de rincosaurios y traversodontes. Recordemos que estos dos últimos grupos exhiben aparatos masticatorios morfológicamente más complejos que los de los sauropodomorfos del Triásico tardío, por lo que es probable que los rincosaurios y traversodontes hayan sido buenos competidores frente a los dinosaurios herbívoros. De otra manera cabría esperar que fueran los ornitisquios y los sauropodomorfos los herbívoros dominantes en el Ischigualastense.

El modelo oportunista, sin embargo, no debe generalizarse a todos los dinosaurios. El registro fosilífero del oeste argentino sugiere una progresiva ocupación de nichos ecológicos por parte de los dinosauriformes desde tiempos mesotriásicos (hace 235 millones de años): a pesar de que las especies de dinosaurios ischigualastenses registrados hasta ahora son





6. CRANEO DE *HERRERASAURUS* con sus grandes "caniniformes" transversalmente comprimidos y de márgenes aserrados. Las mandíbulas no formaban un todo rígido, sino que eran relativamente móviles en su sector medio.



7. LOS DEDOS CENTRALES de la mano del *Herrerasaurus* (*foto*) terminan en grandes garras marcadamente curvas, semejantes a la que las aves rapaces presentan en sus pies. Las garras eran flexionadas por músculos que se insertaban en prominentes tubérculos proximoventrales. Los dedos externos, atrofiados, eran inútiles en la manipulación. Cada uno de estos detalles anatómicos concuerda con los que exhiben otros terópodos primitivos, como *Coelophysis*, a la par que diferencian a *Herrerasaurus* de ornitisquios y saurisquios sauropodomorfos, en los cuales las manos son más cortas y la atrofia de los dedos externos no es tan marcada.



cuatro (*Staurikosaurus pricei*, *Herrerasaurus ischigualastensis*, *Eoraptor lunensis* y *Pisanosaurus mertii*), las diferencias morfológicas que se aprecian entre ellas hacen esperar que en el futuro se documente una elevada diversidad específica de dinosaurios en rocas de esa edad.

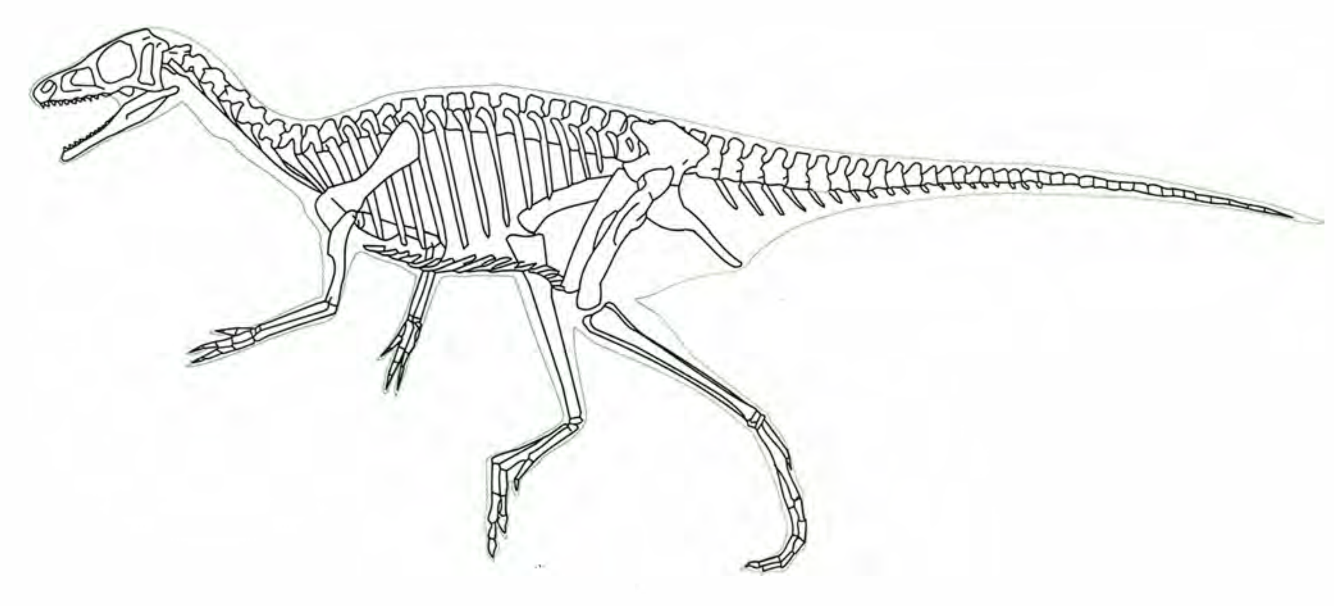
La rápida multiplicación de especies de Dinosauria no ocurrió en un ecospacio vacío, sino en compañía de una variada gama de tetrápodos terrestres, carnívoros y herbívoros. Esta convivencia entre dinosaurios y otros tetrápodos terrestres se remonta por lo menos al Triásico medio, momento en el cual las faunas de tetrápodos se componían por arcosaurios de pequeño tamaño (*Lagerpeton*, *Lagosuchus*, *Pseudolagosuchus*), a los cuales acompañan una amplia variedad de sinápsidos carnívoros, los chiniquodontes, no mayores que un gato, y los herbívoros traversodontes, también de modestas dimensiones.

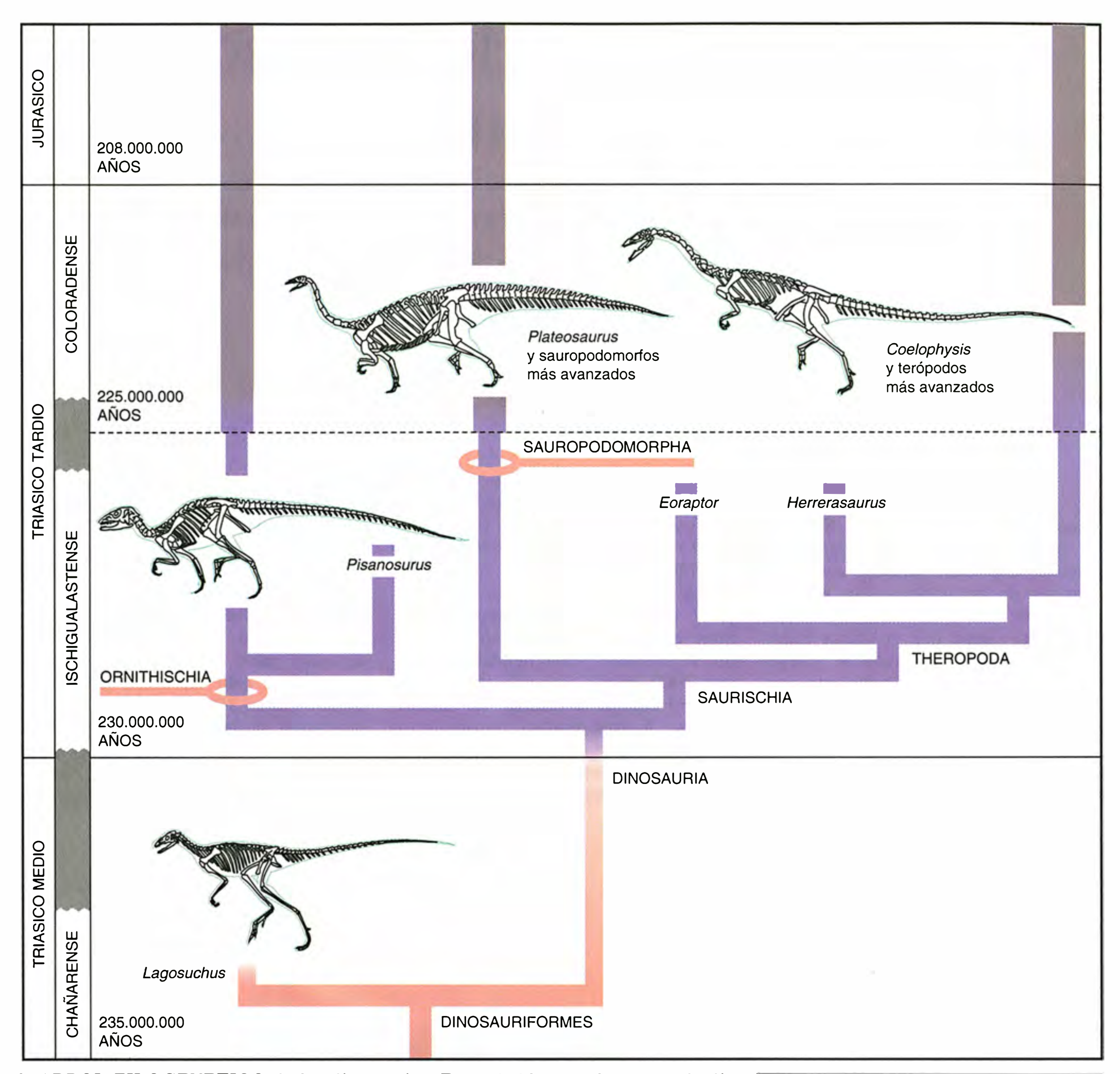
La evolución conjunta de carnívoros de muy diversa filiación (dinosauriformes, arcosaurios cocodriloideos y sinápsidos chiniquodontes) parece no haber estado caracterizada por evidentes interferencias competitivas, al menos en el lapso que abarca la depositación de las formaciones Los Chañares e Ischigualasto. Muy por el contrario, y como bien lo ha hecho notar Bonaparte, en el Ischigualastense asistimos a un aumento de la diversidad general de cada grupo, expresada en el número de especies y variedad de adaptaciones morfológicas.

Sin embargo, algo es evidente: los herrerasaurios alcanzaron un tamaño comparable al de los arcosaurios rauisúquidos, cocodriloideos que carecieron de rivales durante tiempos pre-ischigualastenses. Otro dato destacable es que el número de especímenes de herrerasaurios recuperados en Ischigualasto supera a los correspondientes a otros arcosaurios carnívoros terrestres colectados en la misma localidad. Los testimonios disponibles permiten concluir que los primeros dinosaurios carnívoros no esperaron a la extinción de otros arcosaurios carnívoros para ocupar el puesto de superpredadores.

Competencia y oportunismo constituyen dos procesos que se excluyen mutuamente en las interpretaciones vigentes sobre la temprana evolución de los dinosaurios. Probablemente una combinación de ambos haya interve-

8. *EORAPTOR* es un terópodo morfológicamente más primitivo que *Herrerasaurus* y *Staurikosaurus*, ya que carece de compleja articulación intramandibular, las prezigapófisis de las vértebras caudales no son elongadas, las falanges ungueales no son lacerantes y el pubis no está expandido distalmente.





9. ARBOL FILOGENETICO de los dinosaurios. Es probable que el proceso de diversificación evolutiva de estos reptiles haya estado en plena marcha en tiempos mesotriásicos, en congruencia con la presencia en la Formación Ischigualasto de linajes diferenciados de dinosaurios saurisquios y ornitisquios. No sería improbable que ya en el momento de depositación de la Formación Los Chañares (unos 235 millones de años atrás) hubiera verdaderos dinosaurios. El registro fósil indica que los dinosaurios aparecieron por lo menos 15 millones de años antes de dominar numéricamente las comunidades de tetrápodos terrestres de la Era Mesozoica.

nido en la estructuración de las comunidades de tetrápodos triásicos, pero no podemos precisar entre qué especies y con qué intensidad se produjeron estos fenómenos. De acuerdo con la información a mano, parece más razonable que la explosiva dominancia de los rincosaurios y la profunda diversificación de arcosaurios y sinápsidos hayan resultado de los procesos eco-evolutivos iniciados en tiempos mesotriásicos que afectaron a toda la fauna en su conjunto.

Lo cierto es que aún no hemos dado con dinosaurios verdaderamente basales, sino con saurisquios u ornitisquios con rasgos avanzados, bastante evolucionados con respecto a su ancestro común. Existe una etapa desconocida, que media entre el Chañarense y el Ischigualastense, que necesita ser documentada. Es en ella donde tendremos posibilidades más concretas de descubrir los reales inicios de la evolución dinosauriana.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

DINOSAUR MONOPHYLY AND A NEW CLASS OF VERTEBRATES, R. T. Bakker y P. Galton, *Nature*, vol. 248, págs.168-172, 1974.

NUEVOS MATERIALES DE *LAGOSUCHUS TALAMPAYENSIS*, J. F. Bonaparte, en *Acta Geologica Lilloana*, vol. 13, págs. 1-90; 1975.

SAURISCHIAN MONOPHYLY AND THE ORIGIN OF BIRDS, J. A. Gauthier, en *Memoirs*. California Academy of Sciences, vol. 8, páginas 1-55.

PHYLOGENETIC RELATIONSHIPS OF THE BASAL DINOSAURS, THE HERRERERASAURIDAE, F. E. Novas, en *Paleontology*, vol. 35, páginas 51-62; 1992.

NEW INFORMATION ON THE SYSTEMATICS AND POSTCRANIAL SKELETON OF *HERRERASAURUS ISCHIGUALASTENSIS* (THEROPODA: HERRERASAURIDAE) FROM THE ISCHIGUALASTO FORMATION (UPPER TRIASSIC) OF ARGENTINA. F. E. Novas en *Journal of Vertebrate Paleontology*, vol. 13, páginas 400-423; 1994.

La lección de los huesos de Abu Hureyra

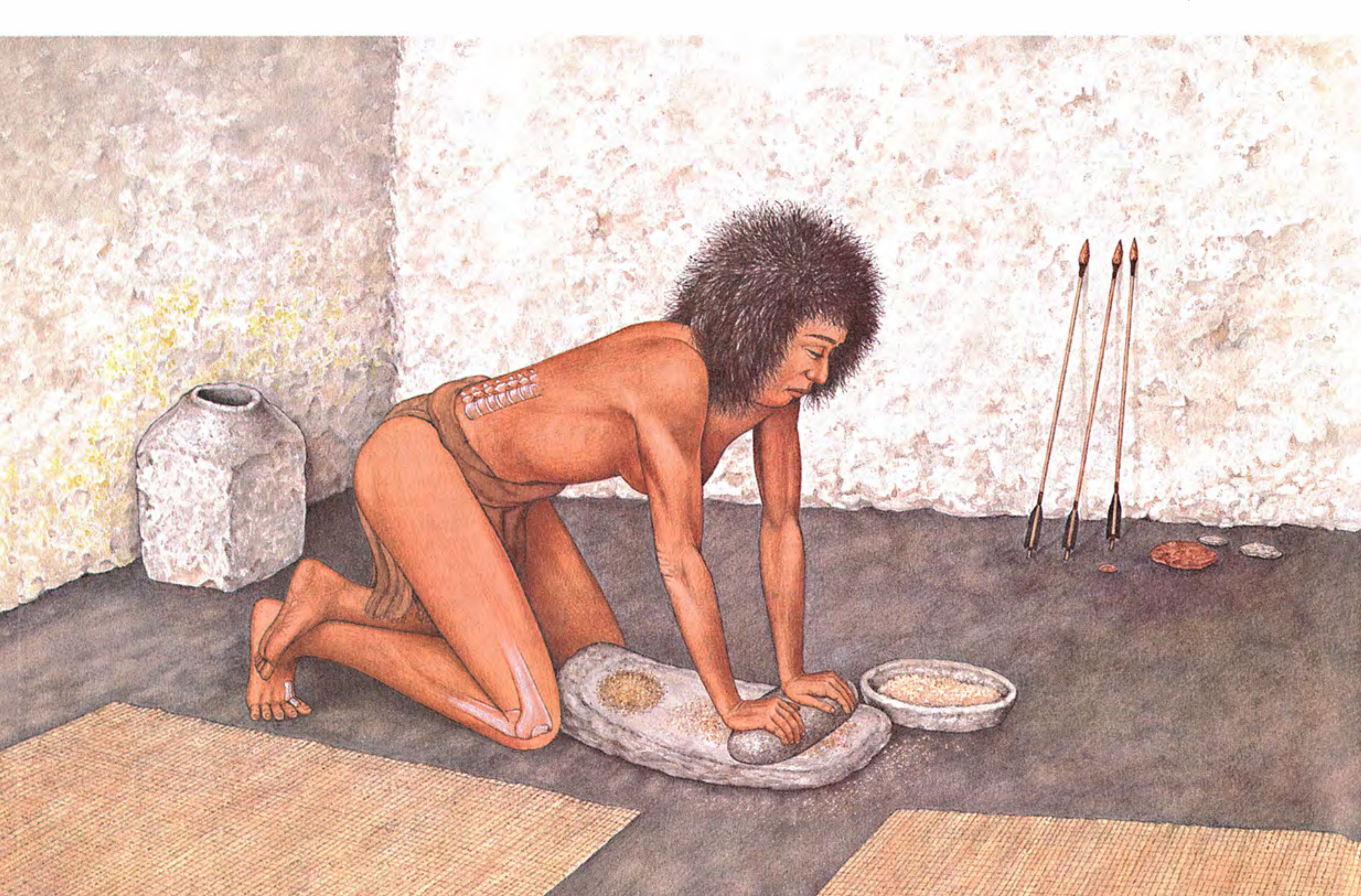
La molienda diaria en una de las comunidades agrícolas del Neolítico temprano instaladas en el Próximo Oriente dejó marcas muy ilustrativas en el esqueleto de sus habitantes

Theya Molleson

La reconstrucción de la vida de tiempos remotos parece labor propia de detectives. Sin pistas firmes, hemos de trabajar sobre pruebas dispersas: huesos, artefactos y ruinas de los abrigos. Por mi función en el Museo de Historia Natural de Londres supe que se había traído a Inglaterra una colección de huesos humanos del Neolítico temprano procedentes de las excavaciones de Abu Hureyra, en el norte de Siria. El trabajo arqueológico lo había realizado Andrew M. T. Moore en 1972 y 1973, poco antes de que el yacimiento se anegara con la presa de Tabqa. (Moore publicó sus resultados en *Investigación y Ciencia* en octubre de 1979.) Los restos esqueléticos, procedentes de siete zanjas, corresponden a unos 162 individuos (75 niños y 87 adultos, de los cuales 44 eran mujeres, 27 varones y 16 de sexo indeterminado). Los depósitos abarcan 3000 años.

A mi equipo le pareció, de entrada, que los huesos podían introducirnos en la vida diaria de los habitantes de este asentamiento y, por consiguiente, de otros grupos del Neolítico que realizaron la transición de la caza y la recolección a la agricultura. Las marcas dejadas por la vida llevada (unas causadas por la enfermedad, otras por el trabajo) pueden quedar impresas en huesos y dientes.

Abu Hureyra se habitó en dos épocas diferentes. La primera, inmediatamente antes del desarrollo de la agricultura, esto es, desde hace unos 11.500 hasta 10.000 años atrás. Los ocupantes preneolíticos de este asentamiento recogían semillas silvestres muy diversas: lentejas, trigo, centeno, cebada, almeces y pistachos; ca-



zaban también las gacelas que acudían hacia el Eufrates en primavera. La segunda colonización se produjo después de un hiato de 200 años; sus habitantes, preneolíticos todavía, cultivaban trigo (*Triticum monococcum* y *T. dicoccum*), avena, cebada, garbanzos y lentejas. Cereales y legumbres que había que preparar antes de comerlos, y en esa tarea se invertía trabajo y tiempo.

La historia de ese cambio aparece escrita en los huesos de Abu Hureyra. Comenzamos por percatarnos de los rasgos esqueléticos que reflejaban grandes tensiones, a veces desmesuradas, provocadas por el transporte: caza, grano y materiales de construcción verosímilmente. Las señales eran más evidentes entre los jóvenes. Si exigimos de los muchachos esfuerzos de ese tenor, acabarán por aparecer cambios en la morfología de las vértebras superiores. Y es lo que hemos observado. A buen seguro, los pesos se cargarían sobre la cabeza: se aprecia un aumento de tamaño de las partes prominentes de las vértebras cervicales, lo que indica un desarrollo reforzado de los huesos; sin ese contrafuerte, el cuello hubiera cedido bajo el peso de la carga. En algunos individuos, los cambios degenerativos de las vértebras cervicales podrían deberse a lesiones continuas por el transporte de pesos.

La población gozaba, sin embargo, de buena salud, si exceptuamos las deformaciones óseas reiteradas: vértebras hundidas (siempre la última dorsal) y dedos gordos de los pies artríticos, malformaciones éstas que aparecían asociadas a signos de brazos y piernas musculosos. Sin la menor duda, los huesos nos hablan de una actividad física agotadora que, además, era perjudicial.

Le dimos vueltas a la posibilidad de que los habitantes de Abu Hureyra hubieran practicado algún deporte. Mas parecía improbable la existencia en el Neolítico de bailarinas lisiadas. De la perplejidad nos sacó un colega que, en sus vacaciones en Egipto, observó que los suplicantes arrodillados de las paredes pintadas de los templos tenían los dedos de los pies doblados hacia delante. Sospechamos entonces que la patología encontrada en Abu Hureyra derivaba de alguna actividad durante la cual era necesario estar arrodillado.

Durante las excavaciones, Moore había encontrado abandonados en las habitaciones molinillos de mano, losas en forma de sillín utilizadas para la molienda manual de los cereales. Yo estaba convencida de que las señales de arrodillamiento tenían que ver con las largas horas de la molienda. Gordon Hillman, que había estudiado los restos vegetales del yacimiento, no andaba tan seguro. Un paso esencial en la preparación de los cereales, aducía, era despojar del cascabillo a los granos machacándolos en un almirez, faena que se realiza también de rodillas. Ahora bien, aunque las dos tareas contribuyeran a deformar las vértebras, era improbable que el que trabajaba con el almirez padeciera las deformaciones observadas en los pies: el sujeto podría haber cambiado de postura mientras majaba, no cuando molía.

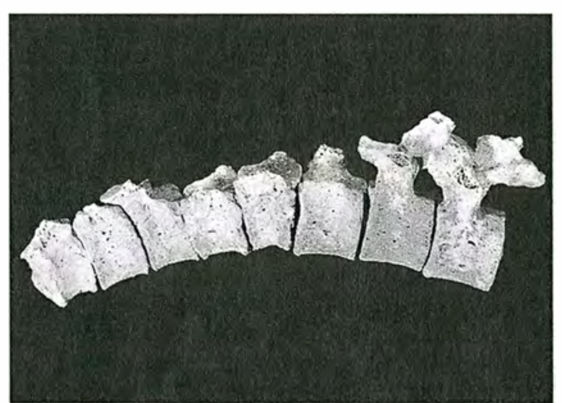
La preparación de los cereales constituía, pues, la actividad más dura del asentamiento y la más exigente. Así continúa ocurriendo en muchos lugares. Había que machacar el grano todos los días, porque las semillas no se conservarían una vez desprovistas del hollejo. El descascarillado en el almirez y posterior molienda exigiría muchas horas. Lo que habíamos encontrado en los huesos, por tanto, eran signos reveladores de largas horas atadas a esa labor. También había marcas de lesiones, causadas tal vez al usar el molinillo con demasiado entusiasmo o precipitación.

THEYA MOLLESON trabaja en el departamento de paleontología del Museo de Historia Natural de Londres y enseña osteología humana en la Universidad de Londres.

Los molinillos hallados en Abu Hureyra sugieren cómo se produjo dicho deterioro. En vez de montarlos en un plinto u otra estructura elevada, práctica seguida en épocas posteriores, se colocaban en el suelo —los restos que había a su alrededor respaldan la idea de que permanecieron donde se habían empleado. Por tanto, el individuo que lo utilizó habría tenido que arrodillarse.

Recreemos la operación. La molendera (era trabajo de mujeres) vierte el grano en el molinillo y sostiene la muela con las dos manos. De rodillas, con los dedos de los pies hacia delante, arrastra la piedra hacia el extremo opuesto del molinillo, donde acaba con el torso y cabeza casi paralelos al suelo: los brazos quedan al nivel de su cabeza, o muy cerca. Una vez alcanzado el extremo, retrocede a su posición de partida con una sacudida brusca. El movimiento por el cual se alargan los brazos durante el arrastre de la muela reclama la acción del músculo deltoides del hombro; los bíceps, por su lado, se encargan del doblamiento de los brazos hacia dentro.

Las áreas donde el deltoides se


1. MOLIENDA DE CEREALES en un molinillo con forma de sillín. Esta tarea diaria, reservada a las mujeres de Abu Hureyra, sometía a tensión varias de sus articulaciones. De rodillas, la mujer arrastraba la muela hacia delante, para volver al punto de partida. Así, una y otra vez. El trabajo, que ocupaba varias horas del día, afectaba en particular a los huesos que se muestran aquí: el dedo gordo del pie, la columna y la pierna. El dedo del pie esta hiperflexionado y dañado; la columna evidencia el crecimiento de las vértebras; la pierna, representada con el fémur encima y la tibia debajo, tiene un refuerzo en la diáfisis del fémur y crecimiento óseo en la rodilla.

inserta en el húmero y el bíceps en el radio están notablemente desarrolladas. El crecimiento extra de los músculos era simétrico, afectando a los dos brazos por igual. En el antebrazo, la tuberosidad radial (eminencia del cuello del radio para la inserción del bíceps) es particularmente perceptible.

El pasar muchas horas de rodillas crea tensiones en los dedos de los pies y en las rodillas, en tanto que la molienda somete a una presión adicional a las caderas y, en especial, la parte inferior de la espalda. Las afecciones características que encontramos en la última vértebra dorsal eran lesión discal y aplastamiento, traumatismos que pudieron ocurrir si la molendera sobrepasó el extremo del molinillo cuando arrastraba la muela o si retrocedió con excesiva rapidez o brusquedad.

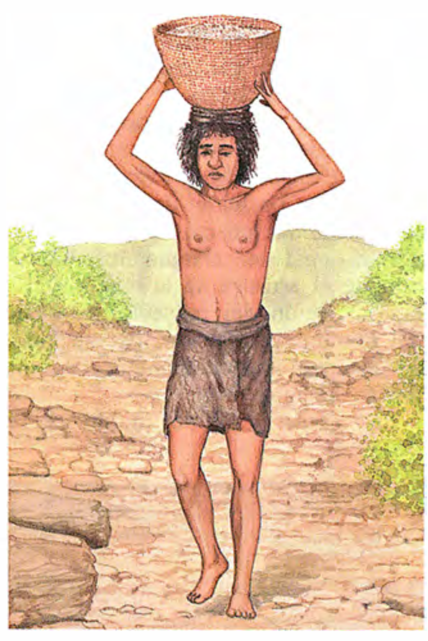
Durante la molienda, el organismo pivota alternativamente sobre las articulaciones de la rodilla y la cadera. El movimiento somete al fémur a fuertes tensiones de flexión, obligándole a desarrollar una suerte de contrafuerte a lo largo de la espalda para contrarrestar los momentos de flexión impuestos desde la cadera y la rodilla conforme el peso del cuerpo pasa de atrás hacia delante sobre el molinillo. La rodilla también carga con mucha presión porque actúa de eje para el movimiento. Aumenta, pues, el tamaño de las superficies articulares. Todos estos efectos se observan en los huesos estudiados: los fémures están curvados y reforzados; las rodillas, con extensiones óseas en sus superficies articulares.

La molienda somete también los pies a grandes presiones. Los dedos se doblan hacia delante para servir de palanca, cuyo punto de apoyo reside en los dedos gordos. En los restos procedentes de Abu Hureyra, las primeras articulaciones metatarsianas de los dedos de los pies tienen mayor tamaño y a menudo aparecen dañadas. Hay signos de lesión del cartílago: superficies lisas y pulidas en la articulación metatarsiana denuncian el rozamiento de hueso con hueso. Algunos individuos habían desarrollado una osteoartritis manifiesta. En un caso, el dedo gordo del pie derecho está mucho más gravemente afectado que el izquierdo. Aunque no es posible excluir un origen infeccioso de esta afección, quizá la molendera tenía costumbre de reposar un pie sobre el otro para aliviar el cansancio. Precisamente ésa es la postura mostrada en un modelo ilustrado en *Egyptian Servant Statues* de J. H. Breasted que representa una molendera.

Los cambios descritos en los huesos de brazo, muslo y dedos de los pies afectaban a su morfología general. Para ello, las tensiones sufridas hubieron de prolongarse muchas horas al día mientras el individuo aún estaba creciendo. Así sucedía hasta hace poco. Michael Aster escribe en *A Desert Dies*: "La vida en el oasis [sahariano] parecía girar penosamente a su propio ritmo. Para las mujeres esto era literalmente cierto, ya que pasaban gran parte de su tiempo dobladas sobre sus molinillos de mano... A menudo miraba a Hawa cuando derramaba los granos en la base de piedra, que se deslizaban en ligero chorreo a medida que los molía, va-

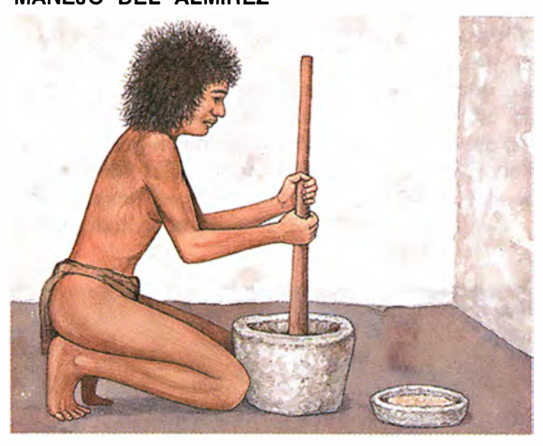
2. ANOMALIAS OSEAS aparecidas entre los habitantes de Abu Hureyra como consecuencia de las actividades reseñadas. El transporte de carga sobre la cabeza deformaba los huesos de la parte superior de la columna; el punteado de la vértebra nos habla de una lesión discal. Machacar grano en un almirez y manejar un molinillo de mano desarrollaban notablemente los músculos de los brazos, como refleja el abultamiento de los dos húmeros (*parte superior de la fotografía*), donde se inserta

TRANSPORTE DE CARGA



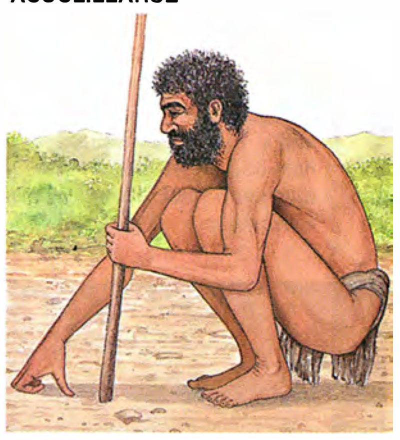








ACUCLILLARSE





ciando la harina en una escudilla cada pocos minutos. A eso de una hora, su hija pequeña, de unos nueve años, la relevaba y empezaba a moler furiosamente. Podían pasar varias horas hasta conseguir la harina suficiente para una comida.”

¿Quién molía en Abu Hureyra? ¿El varón o la mujer? No resultó fácil dar con la respuesta. Los esqueletos estaban tan fragmentados, que tuvimos que idear una forma de determinar el sexo de un individuo partiendo de los huesos específicos portadores de los cambios que, en nuestra opinión, debíanse a la molienda. Al medir los primeros metatarsianos del pie se comprobó que éstos era generalmente mayores en los varones, lo que nos sirvió para comprobar que la mayoría de los huesos afectados por los efectos del molinillo procedían de mujeres.

El grano solían prepararlo las mujeres y las niñas de la familia. Aparece pues una división de papeles, aunque bastante imprecisa, entre estos habitantes del Neolítico temprano. Los ocupantes de Abu Hureyra debieron de haber descubierto pronto que la forma más eficaz de administrarse, en lo concerniente a la alimentación, era la división del trabajo. Podemos suponer que los hombres cazaban y, con el advenimiento de la agricultura, cultivaban las plantas. Las mujeres de la familia se encargaban de la preparación del grano, una tarea o, más bien, una serie de tareas laboriosas que ocupaban muchas horas del día y podían inducir lesiones en la espalda, la rodilla y los dedos de los pies: las repetitivas lesiones del Neolítico producidas por el esfuerzo. No es forzoso inferir que esa división de roles implicase desigualdad entre los sexos o entre los papeles; eso vino más tarde.

Las mujeres no eran las únicas que sufrían. El grano toscamente molido ejercía un efecto nefasto sobre los dientes. Cuando se consumen granos, si no están transformados en harina, hay que tener la precaución de eliminar las semillas duras y las piedrecitas. El número de dientes rotos entre los habitantes del Neolítico temprano de Abu Hureyra da fe de una tría ineficaz (y, probablemente, de la ausencia de cedazos). Por la misma razón, quedaban en la harina aristas o glumas que se alojaban entre los dientes, atacando a las encías. Las caries eran raras. Según parece, la harina no estaba lo bastante refinada ni cocinada (si se cocinaba) como para proporcionar el ambiente adecuado a las bacterias que causan las erosiones.

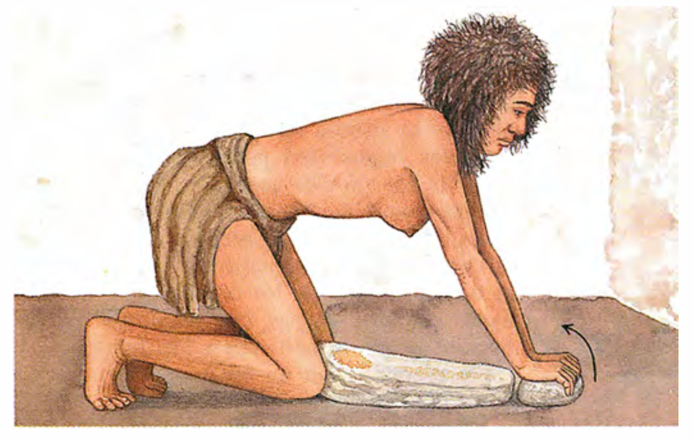
Pero había más problemas. Los cereales, incluso después de ser majados y molidos, producían una comida dura y sumamente abrasiva. Aparte del daño causado por el polvillo arrancado de la piedra de moler, la propia harina desgastaba rápidamente los dientes: muchos los perdían a una edad muy temprana. La micrografía electrónica pone de relieve mellas de tamaño comparable a las que los huesos de los dátiles y otros objetos duros producen en los dientes de primates no humanos.

Algo tuvo que hacerse para paliar el horrendo desgaste dentario. Los arqueólogos habían observado en Abu Hureyra impresiones de esteras en fragmentos de suelo cimentado de los niveles superiores del asentamiento. Este hallazgo mostraba que, para entonces, la gente había dominado el arte textil. La invención del cedazo (una aplicación de los principios del tejer) habría significado la posibilidad de tamizar el grano de las piedrecillas y la barcia. Las mujeres del Próximo Oriente manejan hoy el cedazo con tal destreza que forman hasta tres capas: chinas, barcia y grano. Y van recogiendo del aire las chinas en la palma de la mano. Por eso hay menos dientes mellados. No tenemos pruebas directas de la existencia de cedazos en Abu Hureyra, pero el desgaste dentario disminuye notablemente en la última época.

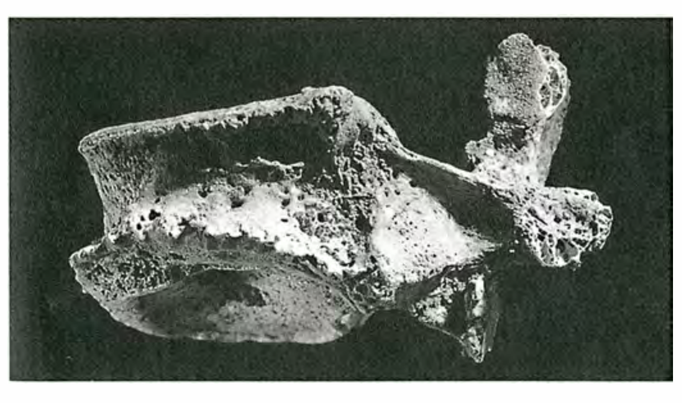
Alguna forma hubo de encontrarse también para guardar el grano recolectado y transportarlo desde el campo. Las cestas podrían haber sido una solución. Percibimos unos surcos extraños en los dientes anteriores de los individuos de los niveles superiores de Abu Hureyra. Para tejer una cesta, hay que manejar tres tallos a la vez. Dado que las manos están ocupadas en

el deltoides y en los dos radios (*abajo*), donde lo hace el bíceps. Al ponerse en cuclillas para descansar, se ejerce tensión sobre la rodilla, produciendo rótulas con muesca. La molienda afecta a la última vértebra dorsal; el acuñamiento y el punteado indican aplastamiento y lesión discal. También se resentían los dedos gordos de los pies: aquí se observa desgaste cerca del extremo derecho del hueso superior del dedo y grave osteoartritis cerca del extremo derecho del hueso inferior.

MOLIENDA MANUAL









sostener las primeras hileras de la urdimbre, se usan los dientes para controlar la operación de cestería. Clark S. Larsen ha descubierto que las indias paiute sujetan las cañas entre los dientes. Ese procedimiento textil termina por formar surcos en la superficie de los dientes anteriores. Las ranuras son casi idénticas a las observadas en los procedentes de Abu Hureyra.

Las señales de trabajos textiles y cesteros escasean entre los huesos analizados, por la probable razón de que tales oficios estaban reservados a unos pocos. Los que las presentan proceden de una misma zona del asentamiento, abonando así la hipótesis de la existencia de un área artesanal. Dicha especialización sería el resultado natural de una división de los papeles. La especialización por actividad permite el desarrollo de la destreza, velocidad y perfeccionamiento en la técnica. Si se libera a una artesana de la necesidad de producir su propio alimento, puede tejer cedazos y cestas más que suficientes para abastecer a la comunidad. Los excedentes servirían para intercambios comerciales.

De otra zona del yacimiento proceden las pruebas sobre un nuevo grupo de artesanas. Descubrimos un aumento significativo del tamaño de las superficies articulares de varias mandíbulas encontradas allí, a la vez que un desgaste desigual de los dientes. Para alcanzar ese desgaste, los dientes debían haber experimentado poderosas fuerzas de compresión que limaran los dientes inferiores por fuera y los superiores por dentro. En algunos casos, el desgaste llega a la misma raíz.

Tetsuya Kamegai ha encontrado cambios similares entre el pueblo maorí que mastica tallos vegetales para fabricar fibra. Hace unos años, J. D. Jennings describió las marcas dejadas sobre piezas masticadas por una dentadura desgastada. Las mascaduras, hechas por gente de la misma época que los componentes de la comunidad de Abu Hureyra, se encuentran por millares en la Cueva del Peligro, de Utah. En ese abrigo se recogieron trozos de cuerda compuesta por tallos de anea masticados y esterillas trenzadas con la cuerda. Para mí, en Abu Hureyra se fabricaban esterillas de una manera similar, opinión que se funda también en las impresiones de esteras encontradas durante la excavación.

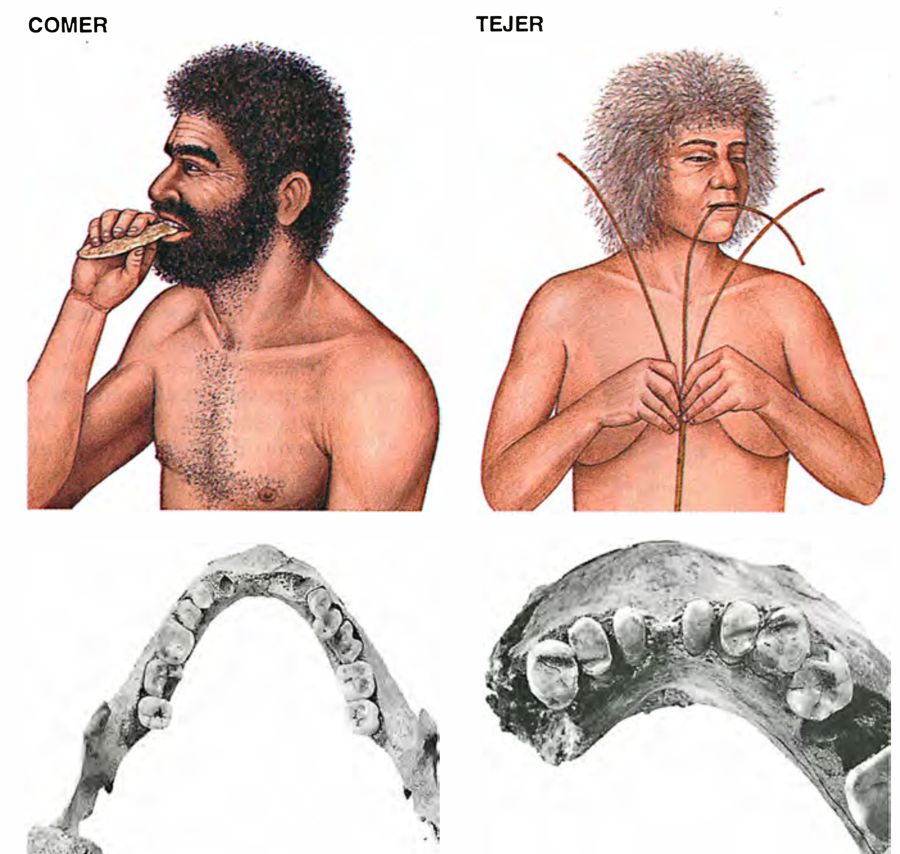
Hace unos 7300 años la nueva tecnología de fabricación alfarera trajo grandes cambios a la comunidad. Las vasijas de cerámica permitían dejar los cereales en remojo y cocinarlos. Así se ablandaban tanto los cereales, que el desgaste dentario cayó significativamente, como puede verse en las micrografías electrónicas.

El cereal cocinado es, a su vez, más sabroso y de digestión más fácil. La cocción libera los carbohidratos de los granos, absorbidos bien por el sistema digestivo. La cocción trajo la preparación de papillas, que tuvieron pronto un efecto notable sobre la estructura demográfica de la comunidad. Vemos plasmada su eficacia si nos detenemos en la mandíbula rota y sin restañar de una mujer; difícilmente hubiera sobrevivido de no haber dispuesto de gachas o papillas nutritivas. Y aún mucho más significativo, una vez que dispusieron de papillas, las mujeres pudieron alimentar con ellas a los lactantes, sin depender exclusivamente de la leche materna. Además, las madres consumían así también una dieta rica en carbohidratos. El resultado de un destete temprano y de una mejor nutrición fue un aumento sustancial de la fertilidad al acortarse el intervalo entre nacimientos.

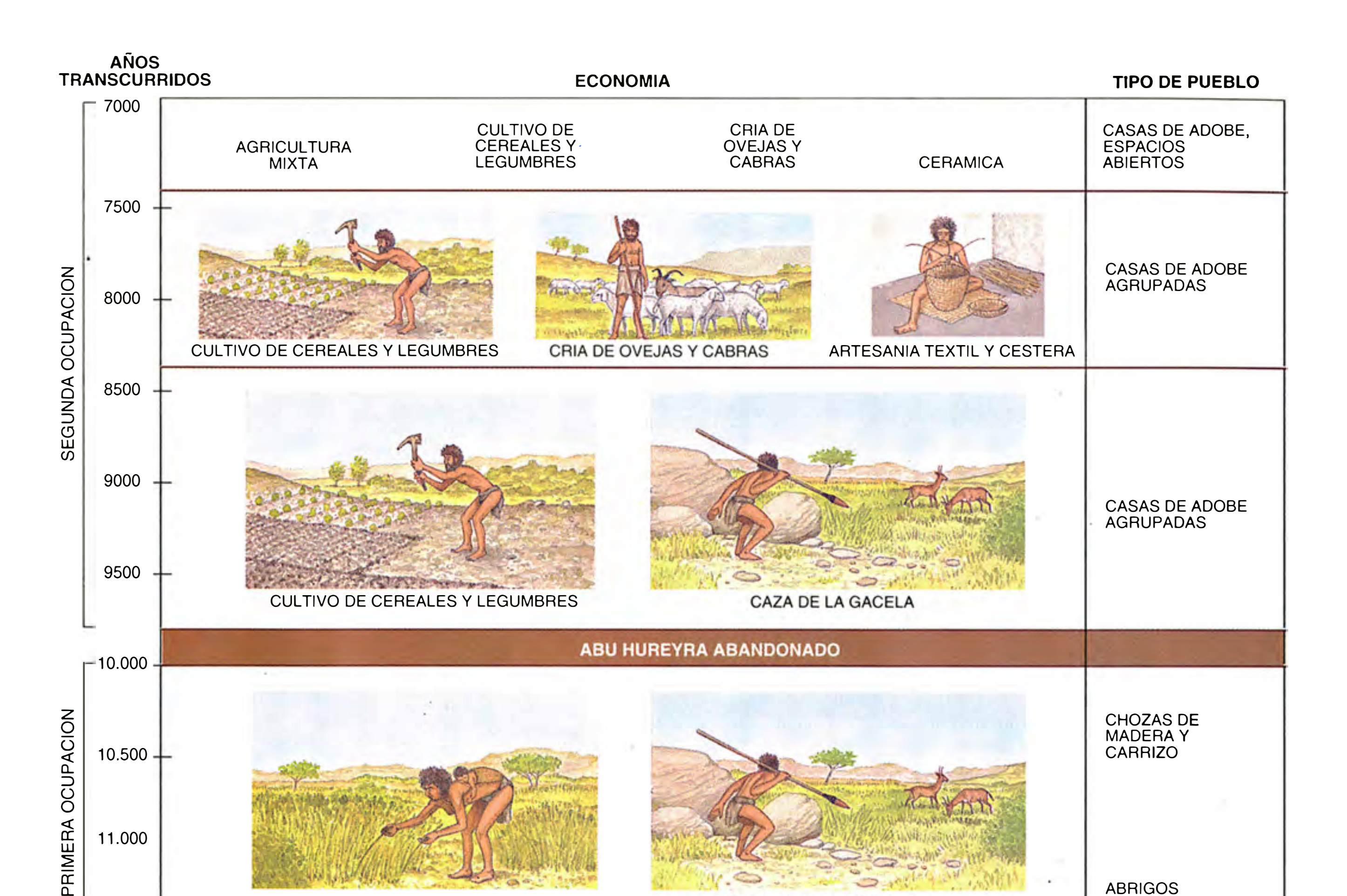
Este efecto puede comprobarse en la proporción mucho mayor de esqueletos de lactantes recuperados de los niveles cerámicos, en comparación con su porcentaje en estratos más antiguos. La diferencia es tal, que induce a sospechar riesgos mayores de muerte por culpa de enfermedades; presumiblemente, la creciente densidad de población facilitaba la propagación de los patógenos. En algunos niños se observa engrosamiento y perforaciones de la cuenca de los ojos, enfermedad conocida como cribra orbitalia, consecuencia probable de la anemia subsecuente a prolongadas infecciones por parásitos.

Es en los niveles cerámicos donde encontramos indicios de caries dentarias. El cambio en la preparación de la comida, poniendo mayor énfasis en la transformación de los cereales cocinados en pan y gachas, creó alimentos pegajosos que se adhieren a los dientes y proporcionan un medio para el desarrollo de bacterias de las caries.

Lo mismo que muchos otros yacimientos neolíticos del Próximo Oriente, Abu Hureyra se abandonó hace unos 7000 años. Ignoramos el motivo. ¿Enfermedades, hambrunas, cambios climáticos? Aunque era una sociedad estructurada, permaneció paritaria has-



3. INTENSO DESGASTE DENTARIO entre los habitantes preneolíticos de Abu Hureyra. La tosca harina producida por la molienda producía abrasión en los dientes. El tirar de las cañas con los dientes mientras se fabricaban cestas daba lugar a profundos surcos.



4. CRONOLOGIA DE ABU HUREYRA. Abarca unos 4500 años contando las dos ocupaciones diferentes del yacimiento. Los primeros en instalarse fueron preneolíticos que no conocían la agricultura. Los habitantes del Neolítico temprano de la segunda ocupación llegaron gradualmente al cultivo de cosechas, la domesticación de los animales y el dominio de oficios.

ta el final (al menos en lo que a las prácticas funerarias se refiere). Pero durante el Neolítico es probable que los papeles estuvieran más definidos y circunscritos.

La incorporación del rol en el tejido social queda reflejada en las prácticas funerarias. Enterraban a sus muertos en las propias casas o en tumbas excavadas a extramuros. Hay más mujeres enterradas en las habitaciones que hombres. Se trataba, por lo demás, de su dominio, donde habían vivido y trabajado. Las mujeres, según parece, tenían zonas acotadas en los límites de la casa; su territorio era el marco de sus actividades. John Gold ve en esta territorialidad una expresión fundamental de la organización social. Las fronteras del rol establecidas en vida se mantenían después de la muerte. Los cambios esqueléticos que indican cómo las mujeres pasaban sus días (moliendo, hilando, tejiendo cestas y esteras) reflejan un compromiso en términos de tiempo y economía que constituye la especialización del rol.

La propia división de las tareas espolearía a quienes no intervenían inmediatamente en la preparación del alimento para que dominaran otros oficios. El cultivo de las cosechas creó sus retos. Había que conducir el agua hasta los sembrados para el riego, impedir que los animales arrasaran las cosechas y transportar el grano recolectado. Estos problemas instaron la exploración de técnicas para resolverlos. Se idearon la cerámica, los cercados y las cestas, y algunos alcanzaron especial habilidad en su desarrollo.

En Abu Hureyra vemos una progresión de cambios que pueden entenderse a la luz de tales innovaciones. Las mejoras trajeron problemas que demandaron nuevas innovaciones. Hubo un avance constante hacia una vida mejor. Abu Hureyra representa el primer paso en el camino hacia la civilización. Pero en este asentamiento no se han encontrado signos de riqueza, clases, instituciones de elite y centros de saber. Debemos buscarlos en otro lugar.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

THE EXCAVATION OF TELL ABU HUREYRA IN SYRIA: A PRELIMINARY REPORT. A. M. T. Moore en *Proceedings of the Prehistoric Society*, volumen 41, páginas 50-77; diciembre de 1975.

DENTAL MODIFICATIONS AND TOOL USE IN THE WESTERN GREAT BASIN. Clark Spencer Larsen en *American Journal of Physical Anthropology*, volumen 67, número 4, páginas 393-402; agosto de 1985.

SEED PREPARATION IN THE MESOLITHIC: THE OSTEOLOGICAL EVIDENCE. T. Molleson en *Antiquity*, volumen 63, número 239, páginas 356-362; junio de 1989.

DENTAL EVIDENCE FOR DIETARY CHANGE AT ABU HUREYRA. Theya Molleson y Karen Jones en *Journal of Archaeological Science*, volumen 18, número 5, páginas 525-539, septiembre de 1991.

DIETARY CHANGE AND THE EFFECTS OF FOOD PREPARATION ON MICROWEAR PATTERNS IN THE LATE NEOLITHIC OF ABU HUREYRA, NORTHERN SYRIA. T. Molleson, K. Jones y S. Jones en *Journal of Human Evolution*, volumen 24, número 6, páginas 455-468; junio de 1993.

La importancia de ser imperfecto

Los artículos siguientes examinan las imperfecciones en física, en matemática, en ciencias naturales, en lingüística y en metalurgia. Las imperfecciones, con frecuencia útiles, son en ocasiones necesarias

Las catenarias de fabricación francesa instaladas en los ferrocarriles japoneses se desgastaban muy rápidamente, mucho antes que en el país exportador... Los expertos estaban perplejos... hasta el día en que uno de ellos observó la colocación de los postes del tendido que sostenían el cable a lo largo de la vía. El misterio quedó explicado por la perfección del trabajo de los obreros japoneses. Los postes, en Francia, habían sido colocados con cierta tolerancia, más o menos a unos 100 metros unos de otros; en Japón, esta distancia estaba medida con precisa exactitud. A consecuencia de esta regularidad se instauraba en la línea un sistema de ondas estacionarias de gran amplitud, y el rozamiento provocado por los desplazamientos del cable conductor desgastaba mucho las catenarias. El defecto del dispositivo residía en su misma perfección, y la solución del problema, en una pequeña imperfección del espaciado entre los postes.

La sincronización temporal puede resultar tan nefasta como la regularidad espacial. Es sabido que las tropas no deben desfilar marcando el paso al atravesar un puente —la perfección de la marcha militar— pues las vibraciones inducidas en el tablero por los impactos periódicos entrañan el riesgo de provocar su hundimiento.

En el campo científico, ciertas imperfecciones pertenecen "a la naturaleza de las cosas". Determinadas imposibilidades de carácter cuántico son inherentes al principio de incertidumbre de Heisenberg: hagamos lo que hagamos, será imposible medir simultáneamente la velocidad y la posición de una partícula con precisión infinita. La realidad es como es. Otras imperfecciones nacen de la imposibilidad de realizar geométricamente configuraciones que harían mínima la energía de conjuntos de partículas; esta imperfección es tan estricta y molesta, que es denominada frustración. Otro ejemplo: al lanzar una moneda, la incertidumbre en las condiciones iniciales entraña una imprecisión absoluta en el resultado del lanzamiento. Ello, sin embargo, no constituye ninguna desgracia irreparable, y puede incluso ser beneficioso, pues de esta incertidumbre inicial se deducen ciertas leyes estadísticas.

Hasta en matemáticas, la más pura de las ciencias, las imperfecciones de naturaleza calculatoria o lógica imponen, o revelan, determinadas limitaciones o prohibiciones. El análisis que las propias matemáticas hacen de sí mismas nos enseña que ciertos cálculos no podrán concluir jamás y que, para los llamados enunciados indecidibles, no se podrá jamás encontrar demostración.

Por otra parte, las imperfecciones abren con prodigalidad nuevas posibilidades. La evolución hubiera sido imposible sin los errores de replicación del ADN, errores que permiten una adaptación mejor a un entorno en transformación. De no haber sido por la granulación del universo justo después de la gran explosión, ninguna heterogeneidad hubiera permitido la posterior formación de galaxias, estrellas y planetas. La causa de estas heterogeneidades iniciales no está completamente elucidada, pero sin ellas nosotros no existiríamos.

Las técnicas se valen de las imperfecciones para asociar a los materiales diversas propiedades. Los semiconductores no existirían de no ser por la adición de imperfecciones, ni tampoco los superconductores de segundo tipo, ni otros materiales especiales en los que es necesaria la adición de impurezas para que posean las propiedades deseadas.

Ocurre con frecuencia que la solución de un problema de física es resultado de una imperfección, natural o impuesta. Tal imperfección puede deberse, por ejemplo, a una ruptura de la simetría, en la que el fenómeno observado, menos simétrico que las leyes que lo rigen, reviste, por contra, un interés superior. Lo mismo en la ciencia que en el arte, la perfección del conjunto nace de la imperfección controlada de los detalles.



Veneración del Buda y adoración del bol de las limosnas.

Principios activos imperfectos

En ocasiones, los productos puros son menos activos contra los parásitos que las mezclas

En el curso de su evolución, los vegetales han sintetizado nuevas moléculas, algunas de las cuales le son útiles al hombre para luchar contra las enfermedades. ¿Por qué curan estas moléculas de origen vegetal? Tal vez, porque las plantas han tenido que luchar contra las mismas bacterias, los mismos virus y los mismos parásitos que el hombre. Las reacciones químicas de las plantas no difieren demasiado de las que orquestan la fisiología de los animales, y los productos que el vegetal elabora pueden poseer efectos sobre organismos no vegetales. El 80 % de los principios activos utilizados en farmacia son de origen natural; por observación de sus efectos sobre las células de su cuerpo, los humanos se aprovechan de la evolución que ha conferido a la planta una ventaja adaptativa. El 20 % de los fármacos restantes son moléculas sintéticas.

Fundándose en observaciones, empíricas pero de inmenso valor, los médicos de antaño establecieron correlaciones entre la ingestión de una planta y el alivio de un dolor, o la curación de una enfermedad. Podemos imaginar cuán penosa —en ocasiones mortal— hubo de ser la andadura conducente al descubrimiento de plantas benéficas para el hombre. Nuestros conocimientos de farmacología descansan sobre un número impresionante de ensayos dramáticos, de los que nuestra ignorancia de la fisiología nos impide, todavía hoy, extraer plenamente sus lecciones. Fue necesario esperar hasta el siglo XIX para que la empeiría cediese ante la química; la eficacia de una planta quedó así ligada a la existencia de un principio activo. El efecto analgésico del opio era conocido por los egipcios y los chinos, pero la morfina, su molécula activa, no fue aislada e identificada hasta 1805. Un siglo después se establecía su estructura química, y se tardó 50 años más en poder sintetizarla.

Podría parecer, a la vista de este rápido repaso, que la senda que lleva desde la observación a la síntesis del principio activo se encuentra bien señalizada; que basta seguir un camino riguroso y sistemático para que los descubrimientos caigan como frutos maduros. No es así. Para empezar, los descubrimientos más notables son, las más de las veces, fruto del azar, de una observación. Puede ocurrir, por otra parte, que una concocción, naturalmente impura, posea mayor eficacia que la molécula sintética del principio activo aislado; no es raro, pues, que la imperfección sea salutífera.

El ejemplo de las medicinas antipalúdicas ilustra bien este aserto. El paludismo es una enfermedad parasitaria producida por un protozoo y transmitida por un mosquito. Los enfermos infectados sufren de fiebres a las que en terminología medieval se denominaban tercianas (periodicidad de tres días), cuartanas (periodicidad de cuatro días), etc. La periodicidad de estas fiebres corresponde al ciclo de evolución del parásito.

Los incas habían conocido la eficacia del polvo de la corteza del árbol de la quina, que los jesuitas trajeron a Europa en el siglo XVII. Dos farmacéuticos, Pelletier y Caventou, aíslan en 1820 su principio activo, la quinina, y ponen a punto un procedimiento de fabricación del sulfato de quinina. Con el propósito de paliar los peligros de un aprovisionamiento difícil, los americanos sintetizaron moléculas de la misma familia. La industria farmacéutica fabrica en nuestros días un producto de un 99 por ciento de pureza, trátese de la quinina o de los productos de síntesis emparentados con ella. Obviamente, a causa de este avance han surgido regulaciones restrictivas que prohíben la comercialización de un producto menos puro resultante de la extracción de la corteza de la quina. ¿Va esto en beneficio del enfermo? No necesariamente...

La quinina, en su perfección, se vuelve ineficaz. Se observó posteriormente que entre los alcaloides extraídos de la corteza había uno, la quinidina, que favorecía la acción de la quinina, por evitar las resistencias parasitarias. Además, a un organismo le cuesta más evolucionar para luchar contra dos productos que para luchar contra uno, pues para ello ha de combinar simultáneamente dos mutaciones.

En consecuencia, lo que ahora se hace es purificar con cuatro decimales ambas sustancias, quinina y quinidina, ¡y luego mezclarlas para reconstruir la imperfección!

PIERRE POTIER



Corteza del árbol de la quina.

Defectos de calidad

En física de materiales ocurre a veces que las discrepancias de la regularidad estabilizan configuraciones favorables

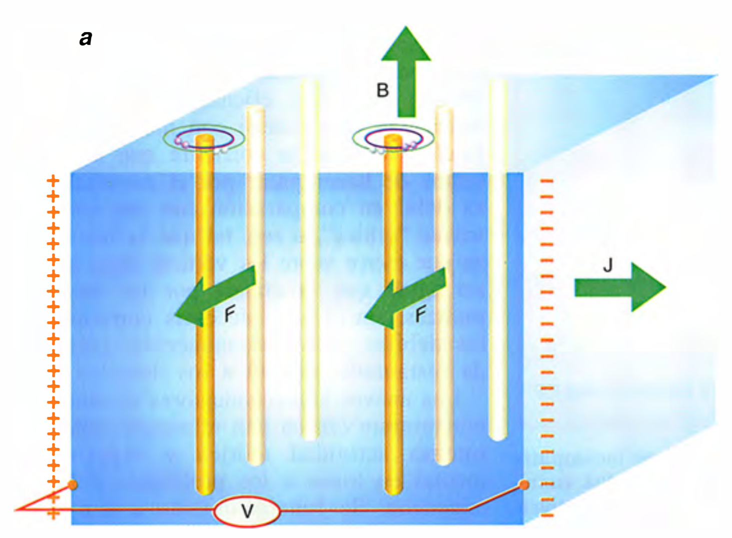
En ciencia, la perfección es aquello que dominamos por completo, que no puede dar lugar a nada inesperado. El motivo de un cristal perfecto se repite hasta el infinito, sin ninguna sorpresa. El desorden, por el contrario, es complejo; su descripción es por definición incompleta e imposible de resumir. De su presencia nace el riesgo, lo imprevisible. Así, la presencia de heterogeneidades o anisotropías amplía las tensiones mecánicas en el seno del material y favorece la aparición y crecimiento de fisuras a partir de puntos cuya ubicación es difícilmente controlable. El progreso, el perfeccionamiento de las técnicas suele pasar por la reducción de las imperfecciones, las cuales deterioran las propiedades que se desean utilizar, enmascaran los efectos que pretendemos poner de manifiesto o embrollan las señales que quisiéramos medir.

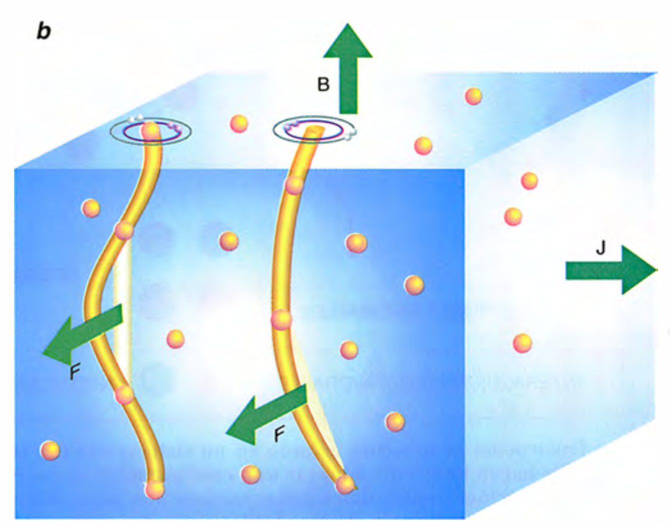
¿Existen situaciones en las que, paradójicamente, el defecto sea estratégico y, la impureza, salutífera? Daremos aquí algunos ejemplos de estas situaciones poco habituales, que ilustran esta idea. Puede ocurrir que, al cambiar las circunstancias, los inconvenientes se truequen en ventajas, aunque ésa sería una versión algo desnaturalizada de nuestra tesis. Por ejemplo, los defectos constituyen por lo general lugares de nucleación, en los que se inician buen número de fenómenos, desfavorables en ciertos casos, como la fisuración mencionada, pero deseables otros, como el crecimiento cristalino o la condensación a partir de "semillas". Ciertos tipos de impurezas "blandas" pueden incluso detener la carrera de las fisuras.

Mayor interés revisten las situaciones en que la perfección sería catastrófica. Como veremos, tal es el caso de "enganche" de las líneas de flujo magnético sobre los defectos de los superconductores, efecto sin el cual la superconducción desaparecería sin más. A veces, incluso, el desorden da lugar a propiedades nuevas y específicas: el sistema sucio no es un sistema limpio un poco deformado, sino que es sistema distinto. Dos ejemplos muy llamativos: el de las proteínas y el de los "vidrios de espín" (sistemas magnéticos muy desordenados), en los cuales los efectos de memoria, fundamentales, están íntimamente asociados al carácter "aleatorio" de las secuencias y de las interacciones. Por llevar la paradoja al caso extremo, se podría sostener que, en un sistema completamente desordenado, la propia noción de defecto desaparecería *de facto*, ¡reapareciendo una cierta perfección! El interés concedido a los materiales amorfos, especialmente en metalurgia o en magnetismo, emana de esta idea. Por ejemplo, la imanación de un material magnético cristalino está "anclada" en una dirección determinada por los ejes cristalográficos (anisotropía magnetocristalina). Resulta preferible algunas veces utilizar materiales "dulces", los llamados amorfos, en los cuales la imanación recobra su libertad angular; materiales en los cuales ha desaparecido el orden cristalino, mientras que abundan los defectos, isótropos casi, en cierto modo perfectos...

Superconducción y campo magnético. Defectos benéficos

La superconducción es una propiedad que adquieren los electrones en metales a temperaturas bajas. Estos pueden entonces "desplazarse" por





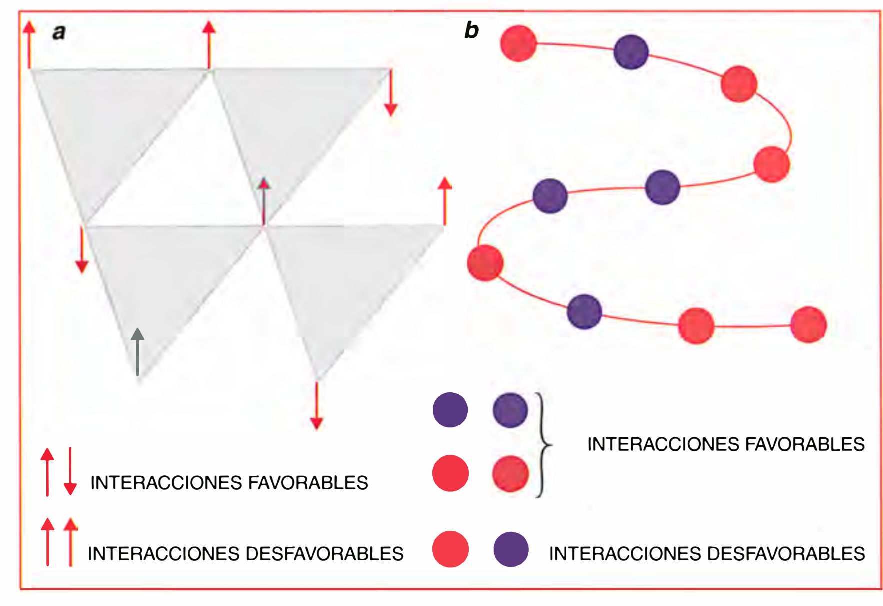
1. (*a*) Configuración no enganchada de los vórtices en una muestra "limpia" de material superconductor, sometida a un campo magnético externo, *B*. Si hay además una corriente de conducción *J*, surge una fuerza *F* que es perpendicular a la vez a *B* y a *J*. Los vórtices adquieren entonces una velocidad *V* paralela a *F*, que crea una "corriente de flujo magnético" (puesto que cada vórtice es portador de un cuanto de flujo) y, por tanto, una diferencia de potencial entre las caras de la muestra. (*b*) Cuando existen defectos locales, cada vórtice se deforma para engancharse a las impurezas. Al ser solicitados por la fuerza *F*, los vórtices se doblan, pero no se rompen, curvándose en la dirección de *F*.

parejas sin merma de energía, dando lugar a una corriente eléctrica sin pérdidas y, por tanto, sin calentamiento. En presencia de un campo magnético, estos electrones lábiles forman torbellinos, y ese movimiento giratorio crea un "contra-campo" cuyo efecto final es impedir la penetración del campo magnético exterior hasta el corazón de la muestra; el campo está "apantallado". Cuanto más fuerte sea este campo exterior más intenso debe ser el movimiento de los electrones para mantener el apantallamiento. Si el campo es muy fuerte, el sistema opta por reorganizarse. Los pares superconductores se deshacen, el movimiento de rotación se interrumpe y el campo magnético penetra en la muestra. Sin embargo, esta penetración puede producirse de dos maneras diferentes. En los superconductores "de tipo I", el sistema se convierte bruscamente en un metal ordinario y pierde sus propiedades superconductoras; en este caso, el campo magnético se encuentra presente por toda la muestra. En los superconductores "de tipo II", el campo magnético permanece confinado en delgados filamentos, paralelos al campo, que atraviesan la muestra de parte a parte; son los "vórtices". En el exterior de estos vórtices, el emparejamiento de electrones subsiste intacto y su don de ubicuidad colectiva debería conservarse íntegramente. Al aumentar el campo, aumenta también el número de estos vórtices y disminuye su distancia relativa hasta que, para cierta intensidad crítica del campo, terminan por tocarse; por encima de esa intensidad, desaparece la superconducción.

La posibilidad de hacer coexistir campos magnéticos fuertes y corrientes intensas (o sea, superconducción) para construir superimanes, por ejemplo, constituye una de las condiciones *sine qua non* de la aplicación técnica de tales materiales, especialmente, de los que conservan esta propiedad a "altas temperaturas"; la situación descrita más arriba, que se materializa en los superconductores de tipo II, parece, pues, ideal. Por desgracia, nada es sencillo. En presencia de corriente eléctrica, estos vórtices experimentan una fuerza que es simultáneamente perpendicular a la dirección de la corriente y a la dirección de los vórtices, y, por ende, a la del campo magnético. En respuesta a dicha fuerza, los vórtices, si nada los retiene, se ponen en movimiento. Pero hemos visto que en el interior del vórtice el emparejamiento electrónico ha quedado destruido; el movimiento del vórtice lleva consigo el de electrones "normales", que sí disipan energía... ¡y la superconducción desaparece! En otra descripción del mismo fenómeno, el movimiento de los vórtices entraña una variación temporal del flujo magnético, y por consiguiente, una diferencia de potencial entre los extremos de la muestra; a diferencia de los superconductores "auténticos", no puede mantenerse una corriente eléctrica sin diferencia de potencial.

Y aquí es donde intervienen nuestros defectos salvadores. La idea consiste en prender los vórtices "con alfileres" para impedir su desplazamiento en presencia de corriente de conducción a través del material, evitando así la disipación de energía. Introduciendo defectos, estructurales o químicos, podemos hacer que localmente, alrededor del defecto, quede inhibida la tendencia del material a la superconducción. Es fácil comprender que los vórtices, que corresponden a regiones donde la superconducción ha desaparecido, tenderán a dirigirse hacia estos vórtices y engancharse a ellos. Como si fuera un hilo elástico flojo, cada vórtice se contorsiona y retuerce para atravesar la muestra, eludiendo en lo posible las regiones "perfectas". La configuración que el vórtice adopta en presencia de esta fuerza de enganche aleatoria ha sido objeto de gran número de trabajos; es un problema que se encuentra en una encrucijada de la física de los sistemas desordenados y que tiene relación con problemas tan diversos como el crecimiento cristalino, la fractura y la turbulencia, y que ha suscitado nuevos métodos teóricos. Así pues, el vórtice se aferra eficazmente a las impurezas y se mueve con mucha dificultad cuando la corriente que tratamos de hacer pasar por el material es débil en comparación con una corriente "crítica", o sea, tal que la fuerza que ejerce sobre los vórtices llega a ser igual que la creada por las impurezas. En el caso de estas corrientes débiles, la superconducción queda restaurada merced a los defectos.

Los nuevos superconductores de alta temperatura crítica han relanzado una intensa actividad teórica y experimental en torno a los problemas del enganche. Su funcionamiento a temperatura elevada exige, precisamente, que la fuerza de enganche sea mucho mayor que anteriormente. En consecuencia, ha sido propuesta, y experimentalmente demostrada, la posibilidad de crear defectos en cierto sentido



2. La frustración se presenta cuando en un sistema existen restricciones incompatibles que le hacen imposible adoptar una configuración de energía mínima. Así, cuando las interacciones entre dos espines vecinos son energéticamente favorables para dos espines antiparalelos y desfavorables para dos espines paralelos, el sistema de espines, representado en un retículo triangular (*a*), adopta una configuración de compromiso. Cuando dos espines están colocados en el vértice de un triángulo, el tercer espín no puede optimizar sus interacciones con los otros dos. Análogamente, las partículas situadas a lo largo de una cadena, con las interacciones indicadas (*b*), adoptan una configuración energética de energía minimal sin optimizar todas las interacciones por pares. La imperfección está en la naturaleza de las cosas...

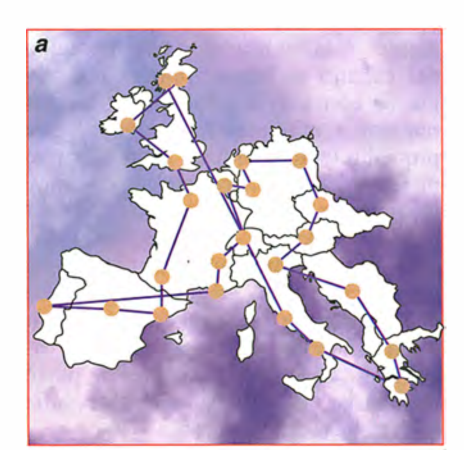
"perfectos", irradiando el material con "iones pesados" muy energéticos, producidos por aceleradores como el GANIL de Caen, previstos inicialmente para la investigación en física nuclear. Estas partículas cargadas, muy rápidas, penetran varias decenas de micrómetros en el material, dejando en pos, a modo de huellas en la nieve, "defectos columnares" de varias decenas de angstroms de diámetro; en esos defectos, en los cuales el material está "quemado", no se puede instaurar la superconducción. Son regiones predilectas para los vórtices; sin tener siquiera que contorsionarse, éstos optimizan su energía de anclaje siguiendo el camino trazado por los iones. Tales "fundas" resultan estar admirablemente adaptadas y aumentan en varios órdenes de magnitud las corrientes críticas mencionadas más arriba. Podría creerse que la solución óptima consiste en crear defectos columnares paralelos entre sí. Error, nos dicen ciertos teóricos; esa regularidad es nefasta. El enganche debería ser más eficaz, aun cuando todas estas fundas estuvieran levemente inclinadas al azar unas con respecto a otras. Los experimentos, todavía en curso, no han dirimido la cuestión.

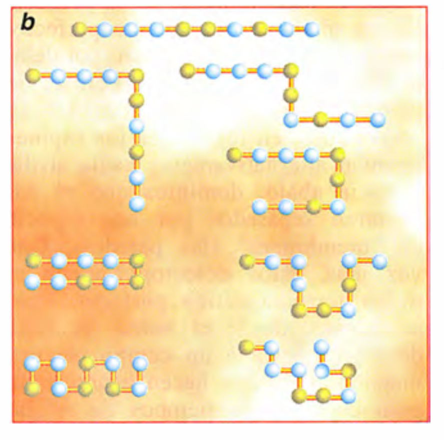
La física de los vórtices en los superconductores nos evoca las dislocaciones en los sólidos. Lo mismo que los vórtices, las dislocaciones son "defectos filamentosos del orden"; del orden cristalino en un caso, del orden superconductor en el otro. La movilidad de las dislocaciones determina las propiedades mecánicas del sólido considerado. Cuanto mayor la movilidad, más deformable es el material. Una de las recetas utilizadas en metalurgia para "endurecer" materiales consiste en "anclar" las dislocaciones sobre impurezas. Sería interesante saber si la idea de los defectos columnares —tan fructífera en el caso de los superconductores— posee interés en este problema de índole mecánica, buscando un enganche "óptimo" de las dislocaciones.

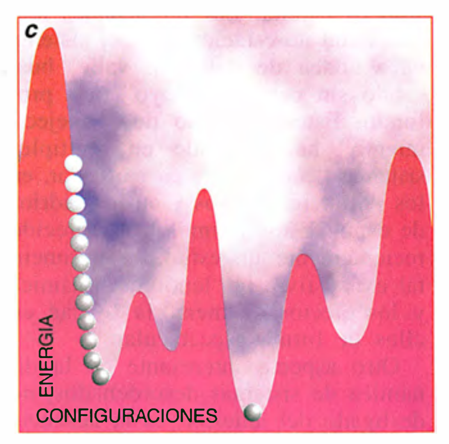
Proteínas y vidrios de espín: desorden y memoria

Las proteínas son macromoléculas parecidas a collares cuyas perlas, sin embargo, no son idénticas. Cada proteína corresponde a una sucesión de perlas "elementales" (de número limitado). A diferencia del collar, que se mueve suelto alrededor del cuello, las proteínas, al asumir su papel biológico, sólo funcionan si están debida y apretadamente plegadas sobre sí mismas. Un plegamiento que, por lo demás, no puede ser arbitrario; el "rostro" que la proteína muestra al mundo biológico que la rodea debe ser inmediatamente identificable. Dos configuraciones con plegamiento distinto corresponden a otras tantas fisonomías distintas de la misma molécula. Cuando se modifican las proteínas del disolvente o cuando la proteína es sometida a temperaturas elevadas, adopta un estado desplegado, planteándose en consecuencia el problema de un replegado correcto. Si las "perlas" estuvieran enfiladas de manera demasiado "regular" (si todas fueran idénticas), sería imposible que se produjera un replegado "específico", o sea, una configuración particular, porque todas las configuraciones replegadas serían más o menos equivalentes desde el punto de vista energético. El que la secuencia de perlas sea en cierta medida aleatoria esculpe el paisaje de energía (más exactamente, de energía libre) de manera abrupta, con algunos "hoyos" extremadamente profundos, que corresponden a estados replegados estables. La energía actúa a la manera de un embudo que precipita la proteína al fondo de su hoyo. El paisaje de energía de una secuencia regular es, por el contrario, el de los maestros menores holandeses, plano e indiferenciado.

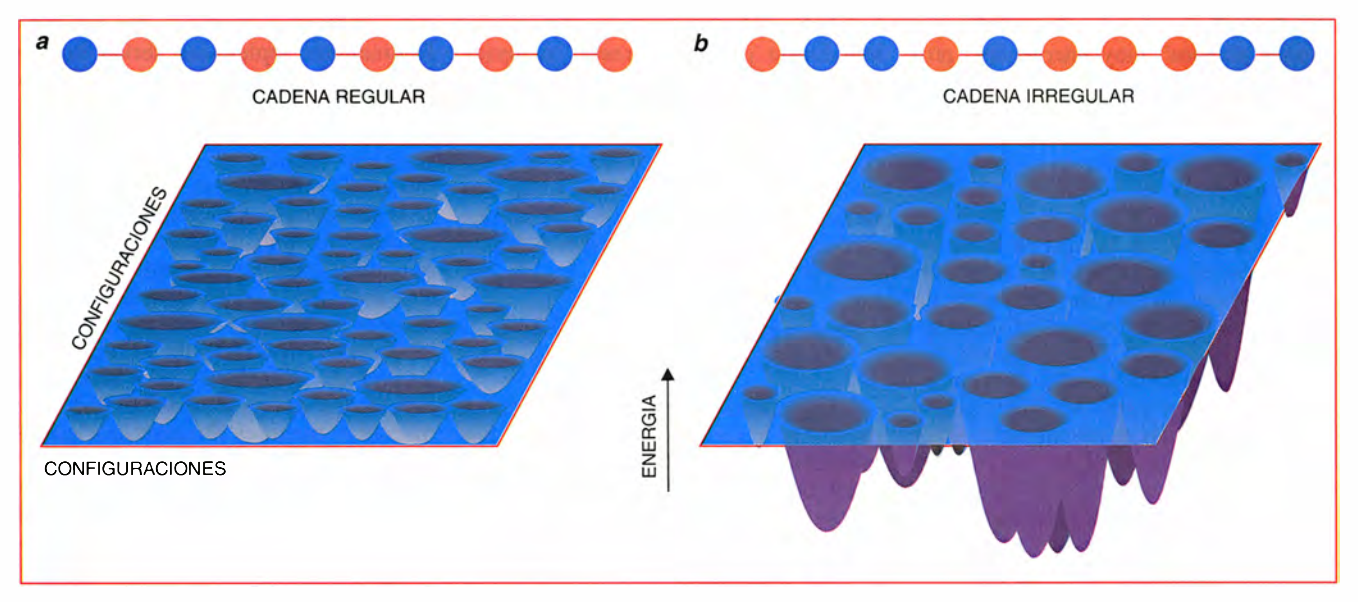
Los paisajes escabrosos de este tipo los comparten sistemas desordenados muy divesos (por ejemplo, los vórtices enclavados descritos) y tiene generalmente dos consecuencias importantes, a saber, memoria y dinámica "lenta". La memoria consiste en la posibilidad de volver a encontrar una configuración específica partiendo de una configuración inicial alejada. Esta propiedad se ha evidenciado al estudiar los vidrios de espín, esto es, compuestos magnéticos desordenados en cuyo interior los pequeños imanes elementales (los espines) no pueden ordenarse unos con respecto a otros mientras las señales que se envíen entre sí sean contradictorias. Se dice que el sistema es "frustrado", como también lo son, por su parte, las proteínas. A mediados de los años ochenta surgió la idea de construir "redes neuronales", sistemas artificiales precursores de los vidrios de espín, en las cuales el paisaje energético era modelable a voluntad, con el fin de alma-







3. Minimización de una magnitud. Dado cierto número de ciudades, el problema del viajante de comercio consiste en conectarlas con el itinerario más corto (*a*). En el caso de las proteínas formadas por mallas (*b*), que interactúan como en la figura precedente, ¿cuál es la configuración de energía mínima? El sistema parte de una configuración dada y tiende hacia el mínimo más cercano (*c*). Este mínimo local no es el más profundo; el sistema ha de recibir cierta energía para franquear las barreras y dirigirse hacia el mínimo absoluto, representado por la hondonada más profunda. Un método numérico que permite esta búsqueda, y que requiere el paso por configuraciones más imperfectas, es de "recocido simulado".



4. La regularidad en la disposición de partículas dispuestas a lo largo de una cadena corresponde a un paisaje energético cuya configuración no tiene mucho relieve. Por el contrario, si las partículas están situadas de modo más irregular, el paisaje se vuelve más atormentado y los valles, más desiguales. Los valles profundos corresponden a configuraciones energéticas estables.

cenar informaciones —lo que provocó la eclosión de una nueva rama de la ciencia ubicada en los confines de la física, la biología y la informática, que constituyó un primer paso hacia la comprensión de la memoria humana.

La otra consecuencia de la extrema rugosidad de un paisaje de energía es la aparición de una dinámica de insólita lentitud, relacionada con su memoria: tras modificar las condiciones exteriores, hay que esperar largo tiempo para que olviden su estado inicial. Tan prolongado es este tiempo que, con frecuencia, las experiencias se realizan sobre intervalos temporales (raramente superiores a algunos días) en los que el olvido sólo es parcial. Las propiedades medidas son no-estacionarias; el sistema vagabundea de valle en valle, buscando sin cesar el "hoyo" más profundo. Este fenómeno de "envejecimiento" ha aparecido en múltiples sistemas "complejos"; en particular, en los polímeros vítreos y en los vidrios de espín. Estos últimos han merecido recientemente un estudio experimental exhaustivo; la "lentitud" dinámica y los efectos de memoria se dan en ellos de forma espectacular.

Otro aspecto interesante de la dinámica de sistemas desordenados, no desligado del anterior, es la ausencia de escala de tiempo característica. En un paisaje energético regular hay una escala de tiempo natural, que es el necesario para salir de un valle, sea cual sea (los valles son todos parecidos). Este "tiempo de relajación" gobierna las propiedades dinámicas del material, por ejemplo, su capacidad de absorción de radiaciones electromagnéticas: únicamente podrán ser absorbidas las frecuencias correspondientes a tiempos de relajación presentes en el material. Este fenómeno constituye un inconveniente si tratamos, por ejemplo, de lograr un avión "furtivo", esto es, capaz de absorber la radiación electromagnética emitida por los radares. El problema, evidentemente, consiste en permanecer "invisible" cualquiera que sea la frecuencia del radar.

Desde hace tiempo se usan los revestimientos de ferritas, imanes no conductores que presentan, sin embargo, el inconveniente de su pesadez. En un imán ferromagnético perfecto, todos los "espines" están paralelamente orientados entre sí. Pero en la práctica el imán suele escindirse en "dominios", en los cuales los espines apuntan alternativamente hacia arriba o hacia abajo, dominios que se encuentran separados por una especie de "membranas" (las paredes). Una vez más, estos defectos rompen el orden ferromagnético perfecto. Pero su interés, desde el punto de vista de la respuesta a un campo electromagnético, es que hacen aparecer un gran espectro de tiempos de relajación y, en consecuencia, una "banda de absorción" muy amplia en comparación con el material monodominio, donde sólo sería eficazmente absorbida una frecuencia. Un paisaje de valles imbricados unos en otros, de todos los tamaños, que origina un espectro diverso de tiempos de relajación, tiene ventajas concretas.

Elogio del error

Los paisajes energéticos como los aquí ilustrados abundan, sobre todo entre los "problemas de optimización"; a éstos pertenece el del famoso viajante de comercio que desea seleccionar el recorrido más corto que pasa por cierto número de ciudades. La búsqueda por ordenador de la solución óptima consiste en un desplazamiento sagaz por un paisaje montañoso, lleno de obstáculos y tropiezos, en busca del valle más profundo. Lo ideal sería dejarse caer por la pendiente más acusada; cada iteración del cálculo es buena, porque la energía (o con mayor generalidad, el parámetro a minimizar) disminuye. Este procedimiento conduce a un mínimo, mínimo que, en general, está muy lejos de la solución buscada. El método llamado "de recocido simulado" consiste en introducir defectos en la exploración ideal, en tornarla un poco desordenada e irracional, en aceptar la equivocación, en "remontar" la energía para permitir al sistema, a plazo más largo, examinar valle tras valle y descubrir la solución.

El conocimiento no progresa de forma puramente lógica, por inferencia axiomática. El error es fecundo, y la confusión, creadora, pues permiten cambiar de horizonte.

J.-P. Bouchaud

La imperfección en el seno de las matemáticas

Las matemáticas no están libres de imposibilidades demostradas ni de lagunas en los métodos de deducción. Pero son ellas también las que confiesan sus propios límites

Nuestro lenguaje, imperfecto, no está falto de contradicciones internas. Así, la frase autoalusiva "Yo miento" está en contradicción consigo misma: si miento al pronunciar la frase, entonces digo la verdad... ¡y no miento! Pero si no miento, entonces digo la verdad, y por consiguiente miento: la frase es verdadera... y así sucesivamente... No podemos decidir si la frase "Yo miento" es verdadera o falsa. Aunque el lenguaje ordinario consiente tales incoherencias, ello no impide la comunicación. Las proposiciones *indecidibles* de este tipo tienen homólogas en matemáticas, las cuales, contrariamente a lo que se piensa, no son siempre el dechado de la perfección y la claridad total. Lo dicho no impide que las matemáticas constituyan una herramienta fundamental para el trabajo científico.

Los matemáticos examinan a la luz de las teorías sus propias técnicas de demostración. La perfección consiste, para ellos, en poder demostrar todo cuanto es verdadero en los objetos que estudian. Pero saben desde 1931 que jamás serán perfectos; los trabajos de Gödel les han prohibido esa esperanza. Las matemáticas son imperfectas, es decir, incompletas; ciertos problemas no son tratables, cualesquiera que sean los métodos matemáticos, presentes o futuros, que se utilicen. En geometría, por ejemplo, no podemos decidir mediante un procedimiento sistemático y fijo si una lista de figuras poligonales dadas será idónea para pavimentar el plano totalmente.

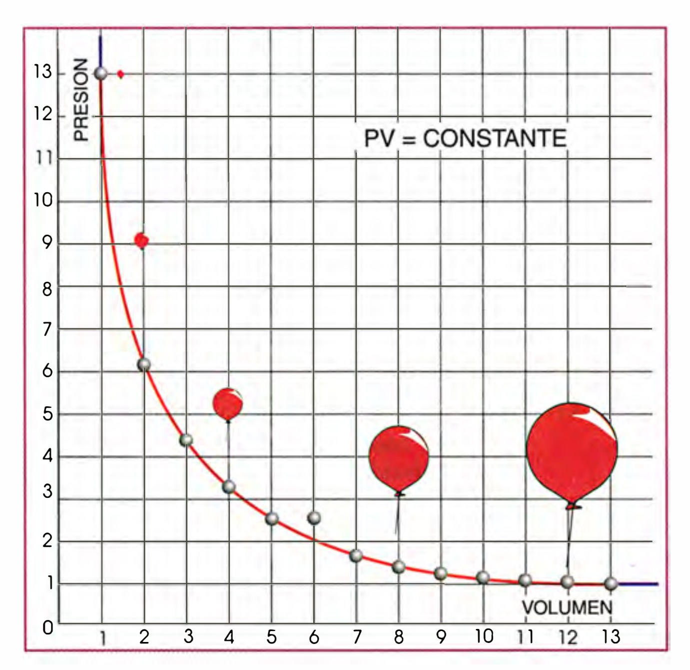
Los famosos teoremas de incompletitud de Gödel muestran que un sistema de demostraciones (un sistema formal) capaz de demostrar todos los enunciados verdaderos de la aritmética (enunciados que solamente hacen intervenir los símbolos lógicos "cualquiera que sea", "existe", "y", "o", "no", "implica" y los símbolos "=", "+", "x", "0", "1", x, y,...) ha de ser contradictorio (¡una grave forma de imperfección!). Con otras palabras, o bien los matemáticos tienen que aceptar su incapacidad para demostrarlo todo, o bien tienen que aceptar ser contradictorios. Obviamente, han optado siempre por la primera solución. Los matemáticos están condenados a no utilizar más que sistemas de demostración imperfectos.

No hay autómatas de demostración

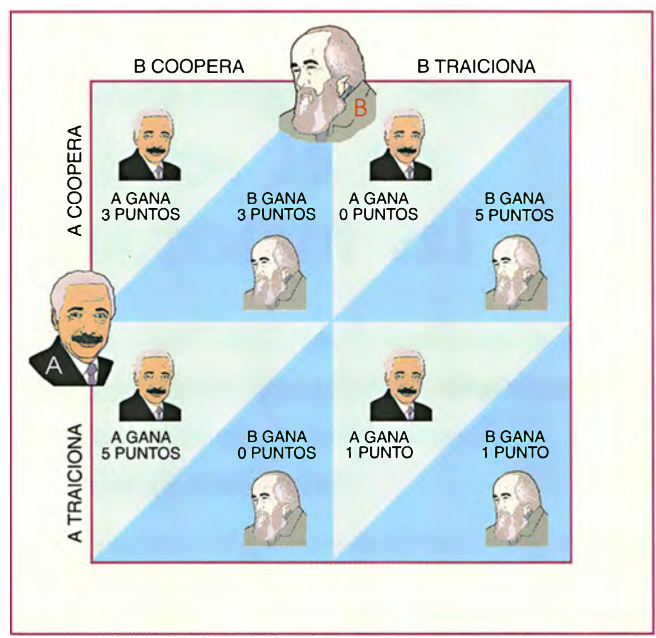
Si ser perfecto significa ser tan claro que puedan ser reemplazados por un ordenador, desde 1936 los matemáticos saben que son imperfectos, gracias a los trabajos de A. Church. El teorema demostrado por Church afirma que lo que podemos demostrar (sea con la teoría de conjuntos habitual o con cualquier otra teoría formalizada digna del nombre) no puede ser reducido a un programa de ordenador; esto es: no existe ningún programa que pueda indicar, cualquiera que sea la fórmula que se le suministre, si esa fórmula es o no es demostrable en el sistema formal de la teoría de conjuntos (la cual, como ya sabemos por los teoremas de Gödel, es imperfecta).

En resumen, no sólo es esencial que el matemático acepte la imperfección de los sistemas de demostración que utiliza —pues ése es el único método de que pueda tener una noción clara de lo que es una demostración— sino que también para él es esencial ser imperfecto (en el sentido de no ser simulable por ordenador) si pretende acceder al contenido de los sistemas de demostración que él mismo adopta.

1. Dado un conjunto de figuras, ¿podremos utilizarlo para pavimentar el plano sin que las piezas se traslapen ni dejen huecos por recubrir? Con las piezas de las formas 1 y 2 se pavimenta el plano, pero no existe un procedimiento general que permita determinar, para toda lista de figuras dada, si hay combinaciones de esas figuras que recubran el plano. El problema de la pavimentación del plano con losetas poligonales es indecidible.



2. En el proceso de inducción, la imposición de ciertas restricciones conduce a leyes imperfectas. En la inducción según la norma de conformidad, nos obligamos a tener en cuenta todos los puntos de medida, lo que conduce a no inducir la ley PV = Constante, pues sería necesario tomar en consideración una medida aberrante, la del volumen igual a 6, por ejemplo. En la inducción según la norma de universalidad, nos imponemos leyes generales válidas incluso fuera de las condiciones experimentales y para todos los gases, lo que conduciría, de nuevo, a no descubrir la ley de los gases perfectos.



3. Cada uno de los dos jugadores puede, ora cooperar, ora traicionar, con las ganancias indicadas. ¿Cuál es la estrategia óptima en el caso de que jueguen gran número de partidas teniendo en cuenta el comportamiento de su compañero? Axelrod sostiene que la mejor estrategia es "Toma y daca", en la que cada jugador repite en cada envite lo que su adversario hizo en la ronda anterior. Pero otras estrategias menos perfectas (más complejas, o que hacen uso del azar) logran superar a la de "Toma y daca", especialmente cuando la comunicación entre las estrategias está embrollada por ruido.

La inferencia inductiva

Al enfrentarse a una serie de datos, el físico, y con mayor generalidad, el científico, trata de adivinar una ley general. Ante los datos sucesivos 1, 4, 9, 16 creerá poder reconocer la ley, que asocia al elemento de lugar n el número n^2. Los teóricos de la inferencia inductiva, al estudiar este tipo de inducciones, han descubierto que el deseo de excesiva perfección impide descubrir las leyes adecuadas.

Por ejemplo, si nos obligamos a no proponer jamás leyes que contradigan los datos disponibles, resultará imposible en ciertas situaciones formular rápidamente la ley acertada. Dicho de otra forma, para poder llegar prestos a la solución correcta es preciso admitir la imperfección, aunque sea provisionalmente. Un físico que observase la sucesión 1, 4, 9, 15, 25 le asociaría la ley n^2, a pesar del 15, porque sabe que sus medidas son imperfectas.

También es mal principio obligarse a no proponer sino las leyes más generales posibles, lo que viene a ser una interpretación simplificada de la idea del filósofo K. Popper, a saber, la búsqueda de una "falsabilidad máxima". Quienes en su ansia de perfección la adopten no dispondrán sino de una limitada capacidad de inducción.

La teoría de juegos

Los especialistas en teoría de juegos han demostrado que, en numerosas situaciones, querer ser perfecto es perjudicial. Así cabe interpretar los abundantes casos en los que la mejor estrategia es la que recurre al azar. Si ser perfecto significa saber claramente y de antemano lo que hay que hacer, eso nos vuelve vulnerables, porque el adversario puede adivinar nuestra estrategia y aprovecharla para explotarnos. La noción de estrategia mixta de von Neumann (en la cual se recurre a un lanzamiento al azar para determinar la acción a realizar en la jugada siguiente) es la traducción matemática de esta idea.

En el estudio del dilema iterado del prisionero, dos adversarios han de encontrarse un gran número de veces y decidir, en cada ocasión, si cooperan o se traicionan. Si ambos cooperan, las ganancias son de 3 puntos para cada uno; si traicionan ambos, ganan 1 punto cada uno, y si uno traiciona y el otro coopera, el traidor gana 5 puntos y el traicionado, 0 puntos. Es fácil demostrar que la conducta perfectamente cooperativa, que no traiciona jamás, es mala estrategia, y que también es mala estrategia la de ser perfectamente malvado, y traicionar siempre. Las mejores estrategias son las que utilizan las dos posibilidades, dependiendo de lo que en ocasiones anteriores haya decidido el adversario, como "Toma y daca", en la que el jugador empieza colaborando y después repite lo que hizo el otro en la jugada anterior. En ciertas versiones del juego, en las que se introduce ruido en la comunicación entre los adversarios, la estrategia "Toma y daca" se pasa de perfectamente determinística y, por no ser lo bastante indulgente, resulta vencida por otras. Per Molander ha demostrado que una estrategia aleatoria (que en ocasiones perdona la traición del adversario) es superior.

JEAN-PAUL DELAHAYE
Universidad de Lille

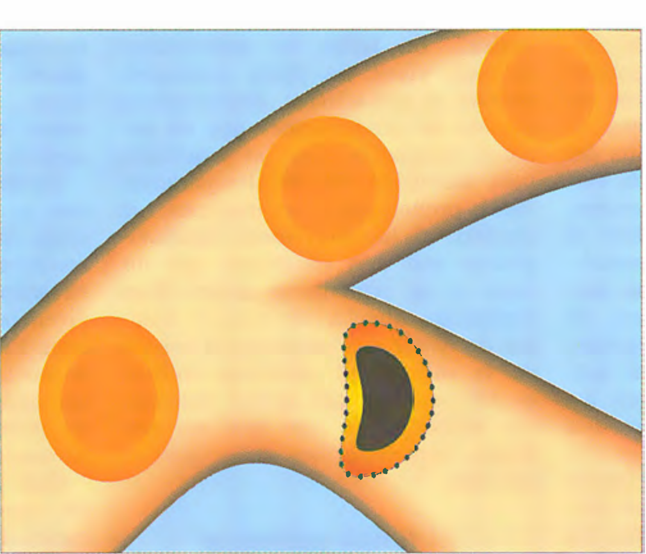
Imperfección y evolución

La imperfección constituye la clave de los sistemas evolutivos. Salva a veces de la enfermedad y favorece la adaptación

La propiedad fundamental de la materia viva es la reproducción. La etimología de la palabra ya lo deja adivinar: cada ser, cada célula, cada molécula proceden de individuos, de células o de moléculas muy parecidos a los que les han precedido, y darán, a su vez, nacimiento a materia viva semejante a ellos. Esta posibilidad de reproducción de estructuras extremadamente complejas no tiene equivalencia en el mundo mineral; la reproducción idéntica de un mismo cristal de estructura simple en una disolución saturada no se le puede comparar. Esta tendencia que empuja a los seres vivos a reproducirse, este "proyecto" inherente a la vida, por retomar la expresión de Jacques Monod, descansa sobre las propiedades de los genes, y de los cromosomas que agrupan a estos genes.

El programa genético está encargado de reproducir sin la menor variación al ser que lo contiene, a la vez que se reproduce a sí mismo. Esta reproducción invariante y perpetua, que Monod calificaba de teleonómica, debe asegurar la supervivencia y la perpetuación de la especie. La materia viva sería una máquina perfecta, programada para reproducirse hasta el infinito. En el interior de este sistema, del que se excluye cualquier variación, la imperfección no tiene lugar y la vida debería reproducirse, inmutable y eterna, sin el menor defecto, obedeciendo al procedimiento establecido de una vez por todas.

Tal invariancia no concuerda con las observaciones. Desde que apareció en la Tierra, hace por lo menos 3500 millones de años, la vida no ha cesado de evolucionar, los seres vivos se han ido transformado continuamente, desafiando esta finalidad o esta teleonomía que les dejaría invariables. De hecho, la causa de esta contradicción reside en las imperfecciones del sistema reproductor. Por muy puesta a punto que esté la máquina, es susceptible de sufrir averías. En el caso de una división, en el momento de la formación de las células sexuales, o durante la fusión de dos gametos para formar un huevo, el sistema puede atascarse, un gen alterarse, un cromosoma reorganizarse después de haberse escindido. Cada uno de estos fenómenos corresponde a una mutación, a la aparición de una estructura nueva. Si las mutaciones son benéficas para la especie y son primadas por la selección natural, se extenderán por la población, quedando perennizado el error inicial que se convertirá así en la nueva norma. La selección natural actúa sobre caracteres surgidos por azar tras mutaciones fortuitas. Los errores de la duplicación genética constituyen los procesos básicos de la evolución. Todas las realizaciones de la materia viva que observamos hoy y todas las que han existido en el pasado, del vegetal al animal, de la bacteria a la inteligencia humana, pasando por las flores más llamativas o los dinosaurios más espectaculares, han sido fruto de imperfecciones en el funcionamiento genético. Sin ellas, la vida no hubiera podido evolucionar y hubiera permanecido en un mismo estadio primitivo, en el que unas mismas moléculas se reproducirían idéntica y perpetuamente.

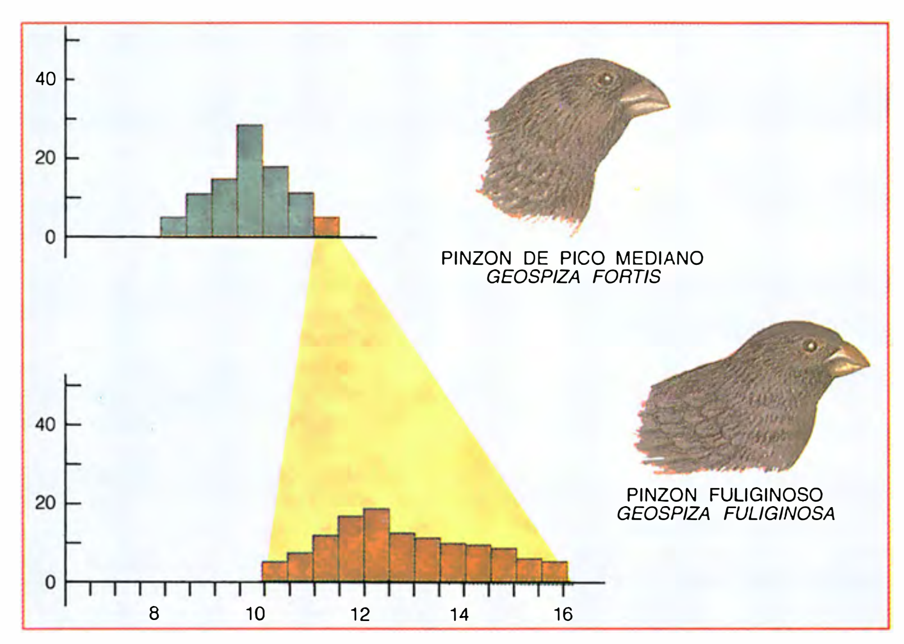


1. Los individuos heterozigóticos están protegidos del paludismo. Un eritrocito *NA*, parasitado por el plasmodio del paludismo, posee en su superficie pequeñas protuberancias características. Mientras no es infectado, el eritrocito circula libremente por los capilares, donde la concentración de oxígeno es pequeña y no se deforma; el eritrocito *NA* parasitado se adhiere a las paredes, queda bloqueado allí y, privado de oxígeno, muere.

Taras benéficas

Normalmente, toda mutación que fuera desfavorable debería eliminarse de la población, o en todo caso, ser muy rara, por los posibles efectos letales sobre los individuos portadores o porque pone en desventaja a esos individuos con respecto a los demás, reduciendo así su probabilidad característica de reproducirse. Este razonamiento no tiene en cuenta los cambios ambientales: las circunstancias de la vida en la Tierra no son inmutables y la aparición de una mutación puede suponer una adaptación mejor a un medio cambiante.

Lo que es más, una mutación desfavorable puede ocultar una ventaja adaptativa; una imperfección puede ocultar en sí a otra. La drepanocitosis, o anemia falciforme, es una enfermedad genética muy grave. Se debe a una mutación génica que troca uno de los aminoácidos que componen las cadenas de hemoglobina (en un cierto lugar, el ácido glutámico es sustituido por valina). El efecto de esta mutación, en apariencia de poca monta, es desastroso. Los eritrocitos se deforman (adoptando un aspecto "falciforme", similar a una hoz) y son destrui-



2. La marginalidad es una potencialidad. Cuando la especie de pinzón *Geospiza fortis* es la única que vive en una isla, la longitud del pico varía de acuerdo con el histograma de lo alto. Cuando coexiste con la especie *Geospiza fuliginosa* en otra isla, es preciso que su pico se alargue para evitar la competencia, como se indica en el histograma inferior. Son los individuos marginales de la población de *Geospiza fortis* los que se corresponden mejor con esta nueva adaptación y prosperan, originando una nueva distribución del tamaño de los picos.

dos. Los síntomas corresponden a los de anemia y la enfermedad desemboca en muerte del sujeto. El mal se manifiesta exclusivamente en los individuos homozigóticos respecto al gen mutante, es decir, cuando esta mutación se encuentra en los dos genes homólogos de un par de cromosomas. En los heterozigotos, en quienes el alelo (la porción de cromosoma) mutante está acompañado de un alelo normal, la afección no se manifiesta. La muerte precoz de los homozigotos, que los elimina del círculo de reproductores, debería bastar, con el paso de las generaciones, para eliminar casi por completo al alelo responsable de la enfermedad.

Sin embargo, observamos una cantidad no despreciable de casos de anemia falciforme en ciertas regiones castigadas por el paludismo. Esta aparente anomalía proviene de que los individuos heterozigóticos, que son portadores del alelo normal y del alelo mutante, resisten mucho mejor el paludismo que los individuos provistos de los dos alelos normales. La selección de los genomas resistentes permite también que el gen portador de la mutación falciforme prospere en la población en su forma heterozigótica, a pesar de que de cuando en cuando el encuentro de dos alelos falciformes en un zigoto conduzca a la muerte rápida por anemia del individuo portador. Vemos así que un gen normalmente deletéreo, en cierto modo imperfecto, se revela útil en circunstancias particulares.

Esta ventaja adaptativa resultante de una imperfección explica la presencia en el genoma de lo que se ha convenido en denominar "carga genética". En todas las poblaciones de seres vivos, los alelos correspondientes a mutaciones desfavorables existen en proporciones que no parecen concordar con las esperadas para alelos en vía de desaparición. Tales proporciones se explican, en cambio, si los individuos heterozigóticos son más resistentes que los otros y se reproducen mejor. Este fenómeno, que ha recibido el nombre de heterosis, demuestra el interés de la diversidad genética incluso en los casos en que utiliza mutaciones desfavorables que son, sin embargo, imperfecciones útiles para el genoma.

El futuro pertenece a los marginales

La comunidad reproductora, que recibe el nombre de especie, comparte un acervo génico repartido de forma más o menos regular en la población. Resulta, en consecuencia, que los caracteres de los individuos, morfológicos o no, se encuentran también distribuidos en la población.

En el caso de caracteres mensurables, por lo general esta población se ajusta aproximadamente a una distribución "normal" o distribución de Laplace-Gauss, cuya gráfica es una curva acampanada. La mayoría de los individuos se arraciman en la porción media de la curva. Quienes se alejan de esta media son relegados a los márgenes de esta curva. La distribución de un carácter traduce su grado de adaptación a un ambiente dado. Cuando el entorno se mantiene estable, quienes mejor responden a las exigencias extrínsecas y están mejor adaptados en lo tocante al carácter de que se trate son los individuos situados cerca de la media. Si la presión de selección es bastante fuerte, la porción central de la curva tenderá a estrecharse, para amoldarse mejor a las imposiciones ecológicas. Este tipo de selección es normalizante y la mayoría de la población se acerca cuanto puede al umbral de adaptación. Subsisten, a pesar de todo, individuos marginales situados a uno y otro lado de los valores próximos a la media, donde se agrupa la mayoría de los individuos.

Pero si las condiciones del ambiente se modifican, los valores medios del carácter quizá no respondan igual de bien a las exigencias del entorno, y en este caso serán los individuos marginales los que pudieran ser los mejor adaptados. Se reproducirán más que los otros, pudiendo, al cabo de algunas generaciones, llegar a predominar, desplazando en consecuencia los valores medios de la población.

Condenados en ciertas circunstancias a permanecer marginados, son ellos, sin embargo, quienes pueden favorecer e incluso asegurar una nueva adaptación, permitiendo la supervivencia de la especie tras las variaciones del ambiente. Esta adaptación de los marginales se ha observado en los pinzones de las islas Galápagos, las mismas que inspiraron a Darwin su teoría de la evolución.

Para preparar el futuro es preferible, pues, que existan en las poblaciones individuos que se aparten de las normas estrictas de la especie. Son estos individuos, imperfectos en las condiciones de adaptación actuales, quienes tomarán el relevo para perpetuar esta especie.

LOUIS DE BONIS
Universidad de Poitiers

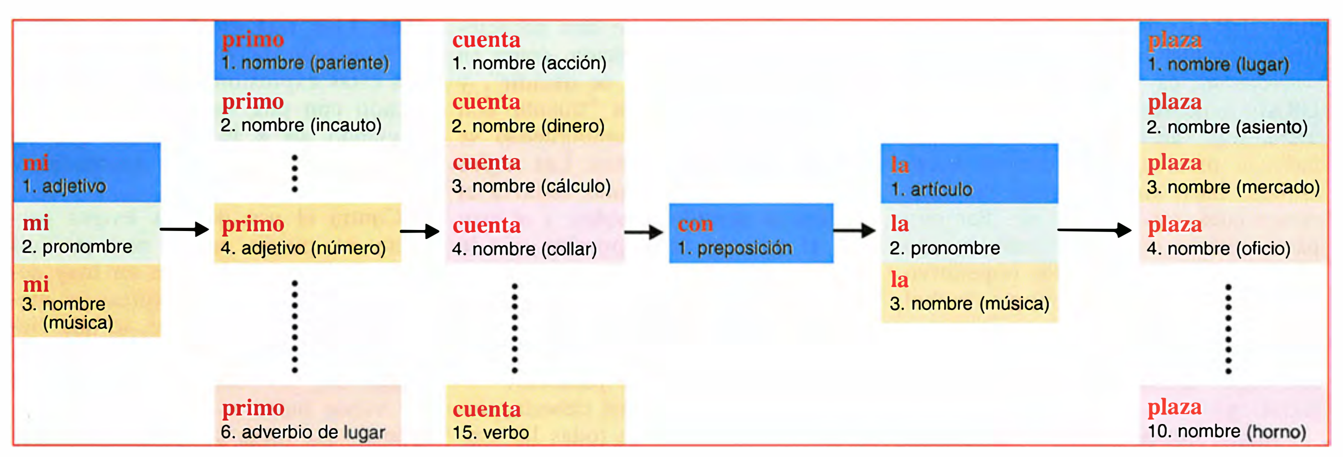
Imperfecciones del lenguaje

La tendencia natural de la mente humana no es hacia la concisión supresora de las redundancias

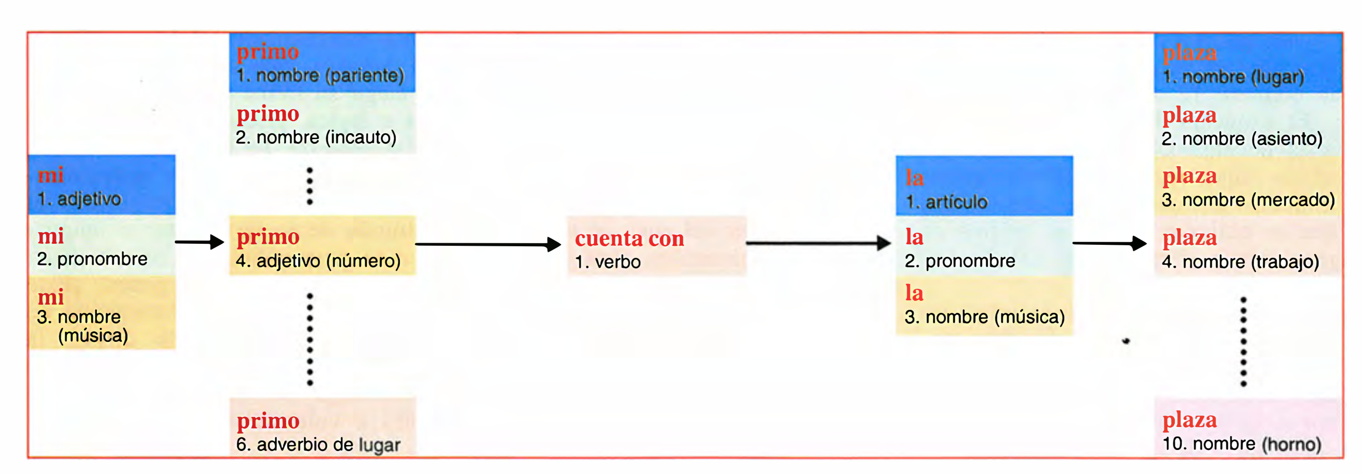
De Babel a nuestros días, la imperfección de las lenguas es causa de confusiones, incomprensiones, contiendas y guerras. Algunos nobles espíritus soñaron con librarse de los ciegos tanteos de la evolución y del sometimiento a una selección histórica basada en los poderes económicos, ideando una lengua que estuviese fundada exclusivamente en el triunfo de la razón. Se pensó que, construyendo un lenguaje ideal, se pondría fin a tales calamidades. La informática está planteando hoy de nuevo este problema, pues a la generalización de su uso (en particular para la traducción automática) se opone como fuerte obstáculo la omnipresente ambigüedad de las lenguas naturales.

La construcción de lenguajes perfectos se viene intentando desde hace siglos. Es una corriente de pensamiento que, como la describe el filósofo italiano Paolo Rossi, de la Universidad de Florencia, se remonta a las Artes de la memoria. Una tradición inventiva de tales lenguajes se desarrolla desde Cicerón hasta Ramón Llull y culmina con la *Característica universal* de Leibniz. A mediados del siglo XVII, John Wilkins describe una condición formal de esa buscada perfección: los significados y las palabras deberán estar en correspondencia biunívoca, con un único sentido para cada palabra y recíprocamente.

Impónese, empero, una primera observación: la lengua escrita parece ser extraordinariamente redundante. Para crear un vocabulario de 300.000 palabras (quizás impronunciables) bastaría con nueve letras. El inconveniente consiste en que cualquier error sobre una sola letra resultaría descabalante: ese error cambiaría la significación. La redundancia, que funciona a modo de código corrector de errores, puede considerarse como un beneficio. No nos detendremos aquí a examinar esta dificultad y daremos por supuesto que en el canal de transmisión de la información no hay rui-



1. ¿Cómo codificar la frase: *Mi primo cuenta con la plaza,* que posee múltiples interpretaciones?



2. Si *cuenta con* es considerado un verbo, desaparecen muchas interpretaciones

dos ni errores. El problema que se plantea es el de la codificación del significado, de ese significado que difícilmente podrá describirse si no es mediante un conjunto de palabras.

De la forma al significado

Dejemos aparte la cuestión de la homofonía (*tuvo = tubo; a ver = haber,* otro de los escollos con que tropieza el reconocimiento informático del habla) y fijémonos en la ambigüedad que presenta una frase tan sencilla como:

Mi primo cuenta con la plaza

cuando es descifrada a golpe de diccionario por un programa de ordenador o por una estudiante marciana. Tal búsqueda de la codificación del significado conduce a los resultados siguientes:

—la palabra *mi* tiene tres acepciones: adjetivo posesivo, pronombre personal y nota musical,

—otras tantas tiene la palabra *la*: artículo determinado, pronombre personal y nota musical,

—*con* es una preposición. El Diccionario de la Real Academia Española (DRAE) le da seis acepciones (pero nos atendremos sólo a una),

—*cuenta* es una voz que en el DRAE tiene dos entradas: en la primera, tras "acción y efecto de contar", se ofrecen hasta catorce acepciones, más una multitud de usos comerciales, coloquiales, etc. Por otra parte, *cuenta* puede ser también una forma del presente o del imperativo del verbo contar. La forma verbal también es gramaticalmente ambigua. Aun prescindiendo de este hecho, la voz sigue teniendo no menos de 15 significados.

—algo similar ocurre con *plaza*, que tiene 13 acepciones principales como sustantivo y otras muchas específicas.

—la palabra *primo* puede ser adjetivo, sustantivo o adverbio. El DRAE le confiere 12 acepciones.

El esquema 1 ilustra la combinatoria de algunas interpretaciones posibles (aquí, para simplificar, hemos limitado el número de acepciones) que se obtienen al leer el gráfico de izquierda a derecha, del estado inicial al final.

Ateniéndose sólo a los significados principales, nuestra extraterrestre tiene por lo menos $3 \times 6 \times 15 \times 1 \times 3 \times 10 = 8100$ formas de traducir palabra por palabra la frase a su idioma marciano antes de aplicarle las reglas de la gramática. Obviamente, a esta cantidad se le podrían añadir a la derecha un par de ceros si se tuviesen en cuenta las locuciones y frases adverbiales correspondientes. Semejante explosión combinatoria rebasaría la capacidad mnémica de los artilugios informáticos al uso.

Esta manera mecánica de representar todas las soluciones es, sin duda, un mal modo de enfocar la descripción de la frase: a nadie que hable nuestro idioma se le ocurrirá que ofrezca ella una ambigüedad tan grande, pues cada una de sus palabras se halla inserta en un contexto que determina su interpretación. Así, más allá del análisis gramatical, la palabra *la* remite a un contexto más general que suprimirá la ambivalencia: *la plaza* en cuestión podrá ser un puesto de trabajo, un asiento en un vehículo, una demarcación militar, etc.

Precisando más, si se considera que el verbo de la frase va ya con un régimen y es *contar con* y no el solo verbo *contar*, las posibilidades se reducen a $3 \times 6 \times 15 \times 1 \times 3 \times 10 = 540$, quedando eliminadas 7560 de las 8100 formas ambiguas antes apuntadas; en el peor de los casos, dado que *contar con* admite dos acepciones (tener en consideración, como en "contó con ellos antes de decidir", y disponer de, como en "cuenta con cinco camiones"), la ambigüedad se reduce en 7060 variantes. Las reglas gramaticales reducen más todavía el número de sentidos viables; y al asociar el artículo *la* al nombre que le sigue, y no como pronombre al verbo que le precede, disminuye mucho más el número de esos sentidos. ¿Qué código semántico podríamos atribuir a esta combinación de palabras?

El criterio de Wilkins debería permitir la eliminación de todas las ambigüedades. Ese criterio exige que se haya establecido la lista de los significados básicos de la vida y de la ciencia, a las que este autor atribuye un código silábico: *Ba, Be, Bi,..., So, Sy,..* lo cual permite recodificar cada sentido de una voz en una combinación como *Sobi* o *Beca*. Para la traducción automática se ha propuesto la utilización de un lenguaje pivote al cual, y a partir del cual, se tradujesen las lenguas naturales, procedimiento por el que se economizaría bastante en comparación con las soluciones basadas en traducir de una lengua a otra. La inteligencia artificial ha suscitado numerosas propuestas de lenguajes lógicos presuntamente universales. Pero desde el siglo XVII no se ha conseguido ningún progreso notable, pese a los artesanales esfuerzos de los lingüistas inventores del esperanto, el volapùk y otras variantes suyas cuyo número rebasa el centenar. No obstante los esfuerzos de los informáticos que tratan de mantener al día estos conocimientos, el dominio de la investigación se halla en peligro, sobre todo al haberse acabado las bicocas que proporcionaba el complejo militar-industrial mantenido por la guerra fría.

Del significado a la forma

El enfoque precedente concernía a la proyección de la forma hacia el significado. En la dirección opuesta, se parte de una idea, un concepto, un hecho, un acontecimiento o cualquier otra entidad de significado, y se examinan las formas lingüísticas que permitirían su expresión. Tomemos el caso siguiente: *Una persona pierde temporalmente la razón.* El esquema ofrece nueve posibilidades idiomáticas para expresar tal caso. Otros esquemas análogos representarían diferentes expresiones, coloquiales o no, como por ejemplo: Luis desvaría; Luis delira; Luis chochea; Luis está mochales; etc., etc.

El método de Wilkins reduciría todas estas expresiones a un único predicado con una variable: DIV(Luis), aliviando así a la memoria, que ha de contener las formas apuntadas y otras muchas más.

Contra el uso de una lengua perfecta se puede argüir con muchas razones. En efecto, ha de ser muy desagradable tener que expresarse mediante fórmulas lógicas, o, lo que viene a ser lo mismo, según unos cánones impuestos. De hecho, la posibilidad de variar hasta el infinito la expresión de las ideas constituye la riqueza expresiva de una lengua y dista mucho de ser una imperfección. En favor de las lenguas imperfectas alegaremos sencillamente el libre albedrío del hombre, que incluye la libertad de elegir su forma de expresarse, poética o lógica, precisa o equívoca, vulgar o refinada. La floración de jergas, de lenguajes codificados o ramificados, ilustra a las mil maravillas el profundo deseo de adaptar el lenguaje a la personalidad, o, como dicen ciertos autores, a los genes. ¡Este deseo no pasa por la eliminación de las redundancias! Por lo demás, la cuestión de la lengua universal no se puede regir por procedimientos formales o voluntaristas.

MAURICE GROSS
Universidad de París 7

La imperfección que silencia a los aceros

Una capa de polímeros inserta entre dos placas de acero amortigua las vibraciones

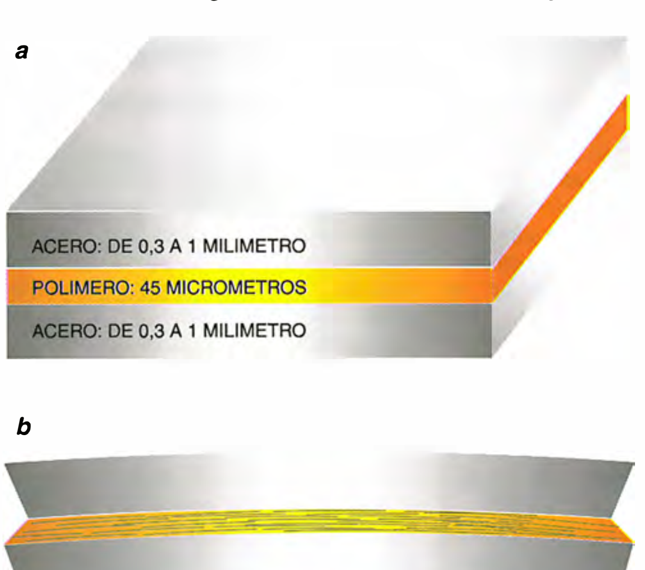
El acero es elástico; vibra sin apenas atenuar las vibraciones. Esta elasticidad casi perfecta, excelente cualidad para un gong, es un defecto en la mayoría de las aplicaciones del acero en automóviles y aparatos domésticos, en las que las máquinas giratorias y los repetidos choques realimentan las vibraciones de las chapas de acero. En consecuencia, estas estructuras son ruidosas.

La Sociedad *Sollac*, del Grupo USINOR-SACILOR, produce un acero dotado de una nueva funcionalidad, la de amortiguar las vibraciones. Esta amortiguación se debe a una fina capa de polímero que se encuentra alojada entre dos láminas de acero; el polímero adoptado es viscoelástico a la temperatura de utilización y disipa en forma de calor la energía cinética de vibración de la estructura tricapa.

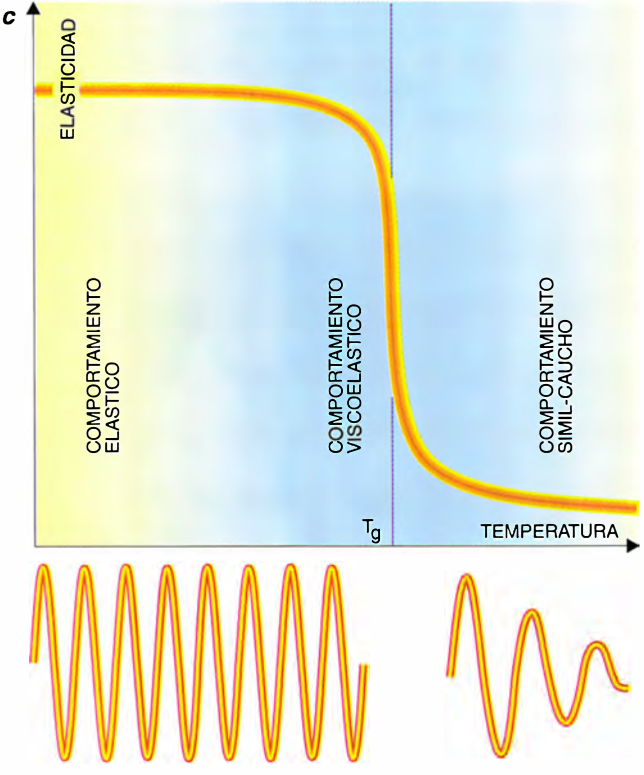
A escala microscópica, esta disipación de energía es consecuencia de la fricción de las cadenas moleculares que constituyen el polímero. Las propiedades viscoelásticas del polímero, y por consiguiente, la intensidad de la amortiguación, son óptimas en las cercanías de la temperatura de transición vítrea, característica del polímero. Podemos elegir el polímero para que dicha temperatura coincida con la temperatura de utilización de la estructura.

Para que la disipación sea máxima es preciso que las fuerzas de cizalladura ejercidas sobre el polímero sean intensas. Las cizalladuras disipadoras de energía son más intensas en el caso de una estructura tricapa que para un simple recubrimiento de polímero. Esta fue la razón de que fuese elegida. Es evidente que para atenuar las vibraciones el polímero ha de ser perfectamente solidario con el metal; el arte del ingeniero consiste en encontrar el polímero y el tratamiento superficial del metal que proporcionen una adherencia máxima entre ambos materiales.

Por último, aunque el emparedado así formado puede ser pegado, embutido o atornillado sin dificultad, para poder soldar las planchas es necesario hacerlo conductor. Esta conductividad se obtiene incorporando a la resina partículas metálicas antes de solidificarla en una capa plástica.







La fina capa de polímero emparedada entre dos chapas amortigua las vibraciones (*a*). Tras las flexiones de la estructura, los frotamientos de las cadenas de polímeros transforman en calor la energía mecánica de las vibraciones. A tal fin, la capa de polímero debe adherirse al acero (*b*). La temperatura *Tg* de transición del polímero corresponde a la amortiguación máxima de las vibraciones (*c*).

Ciencia y empresa

Biotecnología

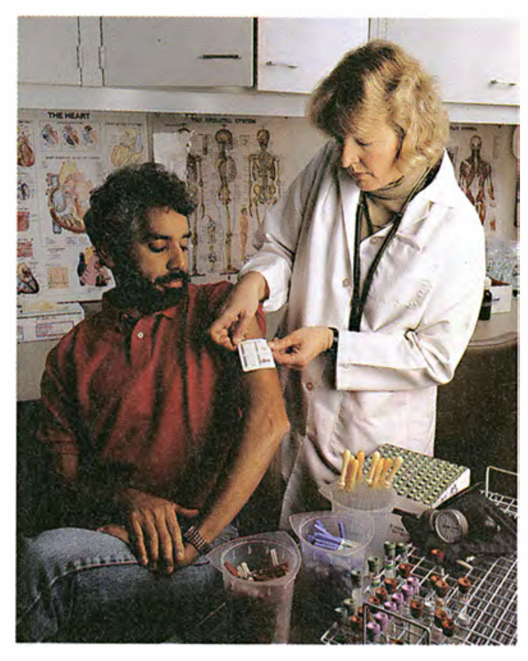
Emplastos eléctricos

Al menos cinco fabricantes de equipos médicos están desarrollando pruebas de investigación o clínicas para lanzar al mercado un emplasto transdérmico, completado con una pila y electrodos que suministran una ligera corriente a la piel. El emplasto no electrificado se ha usado para administrar diversos compuestos: nicotina para los fumadores arrepentidos es uno de ellos; otro, escopolamina para los mareos de los viajes. Los fármacos transportados a través de la piel tienen masas moleculares de no más de algunos cientos de daltons. Con un emplasto eléctrico, penetran a través de la epidermis moléculas más pesadas, que se mueven con la corriente eléctrica.

El emplasto eléctrico típico consta de una pila, dos electrodos y un controlador hecho de microprocesadores. Se da el caso de que uno de los fabricantes, la compañía irlandesa Elan, tiene incluso un acuerdo con una empresa suiza para desarrollar un aparato de suministro de fármacos semejante a un reloj de pulsera.

Existen fundadas esperanzas para suponer que el emplasto eléctrico ampliará el mercado de los aparatos transdérmicos. El apósito podría constituir la manera ideal de transfundir péptidos y proteínas sintéticos.

La seguridad es, naturalmente, un requisito esencial. Las principales compañías implicadas —Becton, Dickinson & Co., Iomed, Alza y Elan— consideran el emplasto como un remedio casi a prueba de inexpertos, que permite a los pacientes la automedicación de analgésicos. El nivel controlado de corriente eléctrica garantiza un nivel de administración de fármaco más previsible que el parche. Al administrarse las cantidades precisas, se evitarían las sobredosis de opioides que se ha producido con emplastos no eléctricos. Los equipados con un botón facilitarían la administración del fármaco según se fuera necesitando. Se trata de una técnica barata que concede al paciente una movilidad mayor que los actuales sistemas de automedicación.



No hace falta la inyección en el brazo cuando se usa un emplasto eléctrico que puede infundir en la piel moléculas mayores que las aplicadas con emplastos transdérmicos corrientes

Se ha demostrado también que el emplasto eléctrico podría aplicarse en la administración de agentes anticancerosos, por ejemplo en el caso de tumores de piel. Asimismo, el emplasto podría infundir hormona luteinizante para aumentar la fertilidad, calcitonina para la osteoporosis y antibióticos destinados a combatir la infección en tejidos quemados.

En la competencia por llegar al mercado, los fabricantes han ideado nuevas variantes del arquetipo original. En vez de aplicar una corriente continua baja, el emplasto de Cygnus Therapeutic Systems produce un impulso de un milisegundo de varios cientos de volts para generar un alto campo eléctrico. Según se afirma, esa técnica de electroporación aumenta la permeabilidad de la piel y consiente una penetración más fácil del fármaco.

Cualquier producto nuevo tendrá que evaluarse cuidadosamente para evitar la irritación causada por la estimulación de la piel con una corriente eléctrica. La aprobación por parte de los organismos oficiales podría constituir un desafío: los legisladores tendrán que hilar muy fino para realizar la evaluación técnica de un producto que es mitad fármaco y mitad aparato.

Si tienen éxito, los fabricantes han concebido ya un nuevo modelo de emplasto eléctrico. La corriente eléctrica de una pila —y el consiguiente flujo de medicamento— se podría regular incorporando diminutos sensores en la unidad electrónica de control. Con el emplasto eléctrico inteligente, el médico podría un día decir: "No notará usted nada", y lo diría de verdad.

GARY STIX

Energías renovables

¿Quién dijo secundarias?

Siempre resulta arriesgado predecir, pero aventurar el devenir de las fuentes de energía constituye la forma más peligrosa de este deporte profesional. Pese a ello, y tras muchos años roturando el campo, la compañía Shell presenta una ejecutoria más sólida que la de la mayoría de las empresas del sector. El grupo de planificación de ese gigante tiene en su haber, entre otros méritos, el de avisar sobre la posibilidad de una crisis de petróleo antes de la brusca subida del precio del crudo en 1973. De modo que, cuando Shell habla, todo el mundo escucha atento. En este momento, los expertos tienen pegados los oídos ante las puertas de Shell International Petroleum Company de Londres, empresa de servicios del grupo Shell.

Y lo que están oyendo es pura heterodoxia. La sección de asuntos ambientales de la firma, dirigida por Roger Rainbow, ha esbozado un futuro donde las fuentes renovables crecerían hasta dominar la producción mundial de energía hacia el año 2050. Esta perspectiva contrasta de plano con los estudios del Consejo Mundial de la Energía (WEC) y de

la Agencia Internacional de la Energía (IEA). La WEC, por ejemplo, considera que las "nuevas" energías renovables, que abarcan la solar, la eólica, las pequeñas hidroeléctricas y las modernas fuentes de biomasa y oceánicas, aportarán sólo un magro 5 por ciento de la producción mundial de energía en el año 2020. En este marco, los combustibles fósiles satisfarían la mayor parte de la demanda global de energía hasta mediados del próximo siglo, mientras que la fisión nuclear desempeñaría un importante papel de apoyo.

Las previsiones de la WEC, resultado de un estudio de tres años y seiscientos millones de dólares, se publicaron el año pasado. Según uno de sus pronósticos a plazo medio, la producción mundial de energía habrá aumentado en un 80 por ciento para el año 2020, lo que representa un equivalente de 16.000 millones de toneladas métricas de petróleo. Se requerirá esa producción para cubrir la demanda de una población humana que habrá pasado de 5500 millones (en 1990) a 8100 millones en el 2020. (Cifras de las Naciones Unidas y el Banco Mundial.) Los estudios de la WEC y la IEA dan por supuesto que las nuevas técnicas no habrán alcanzado el desarrollo suficiente para captar una fracción importante de los mercados del carbón, petróleo y gas natural.

Pero Rainbow y sus colaboradores, especialmente Georges DuPont-Roc, jefe del grupo de planifición de asuntos energéticos, discrepan. Aunque no ha terminado el estudio de la Shell, Rainbow y DuPont-Roc han proporcionado a los funcionarios del Departamento de Energía de los EE.UU. y a los del Banco Mundial un resumen del trabajo en curso. Por su lado, Peter Kassler, adscrito también al emporio petroquímico, ha expuesto algunos aspectos clave del proyecto ante el Consejo Mundial del Petróleo.

Kassler esboza dos supuestos geopolíticos posibles para los próximos 25 años. En uno, proseguiría su curso la tendencia global hacia la liberalización económica y las reformas democráticas de los años ochenta. A tenor del mismo, se asistiría a un fuerte incremento de la demanda de energía en países en vías de desarrollo, especialmente China y la India, los dos países más poblados del mundo. Contemporáneamente aumentaría el rendimiento energético en virtud de la competencia creciente. Los impuestos sobre la energía interiorizarían los costes ambientales, lo que ayudaría a estimular el desarrollo de tecnologías limpias.



Los generadores eólicos dominan el paisaje de muchas colinas y llanos. Las fuentes de energía renovable, como la del viento y la fotovoltaica, pueden hacerse con buena parte del suministro mundial a partir del año 2050, según análisis de la compañía petroquímica Shell

Las energías renovables ganarían también en importancia, aunque menos, en el segundo supuesto. Las tensiones regionales, tanto económicas como políticas, dominarían el globo. Crecería la demanda aunque lentamente; si bien habría un aumento del rendimiento energético mucho menor que en el primer esquema. Las leyes proteccionistas debilitarían las fuerzas del mercado. Los impactos del precio del petróleo exacerbarían el deterioro de las relaciones internacionales, y las preocupaciones ambientales espolearían el control gubernamental de las industrias energéticas hasta niveles todavía más estrictos. Los nuevos mercados de energías renovables se abrirían, en su mayoría, en los países pobres o se desarrollarían localmente a bajo coste.

En opinión de Kassler, la opción proteccionista es una mala noticia, no sólo para las empresas petrolíferas, sino también para el entorno. Bajo cualquier punto de vista plausible, a los países en vías de desarrollo corresponde la mayor parte del crecimiento de la demanda a lo largo de los próximos 30 años. Si no tienen acceso a tecnologías nuevas y de alto rendimiento energético, seguirán la vía del derroche que han recorrido los países industrializados.

En el supuesto más optimista, especula Kassler, las tecnologías de energías renovables pueden muy bien "comenzar a ser competitivas con los combustibles fósiles alrededor del año 2020 o 2030". Pronostica que las técnicas de combustibles fósiles serán probablemente incapaces de reducir costes con la celeridad que lo harán las más jóvenes competidoras. Entonces, "aumentarán los usos potenciales de las nuevas tecnologías". Los países del Tercer Mundo podrían adelantarse a los países ricos en la carrera por un alto aprovechamiento energético.

Kassler prevé también cambios en el lado de la demanda. La realidad virtual podría, según conjetura, conducir a una disminución en la demanda de viajes, rompiendo así el crecimiento exponencial en la movilidad personal que se ha mantenido durante tanto tiempo. En cualquier caso, el uso de combustibles fósiles debería comenzar a disminuir hacia mediados del siglo venidero.

Las emisiones de dióxido de carbono, que muchos científicos de la atmósfera esperan conduzca a un apreciable calentamiento global, comenzarían a reducirse. En el futuro a plazo medio que considera la WEC, la concentración de dióxido de carbono continuará creciendo, durante todo el próximo siglo, desde el actual nivel de 358 partes por millón hasta alcan-

zar las 600 partes por millón hacia el 2100, para seguir subiendo.

Rainbow afirma convencido que, a largo plazo, los supuestos de "todo como siempre" están "fundamental y profundamente equivocados". Cree "evidente" que "no se usará mucho carbón, petróleo o gas de aquí a 100 años". Shell trabajó antaño con la hipótesis de futuros de "energía verde" dentro de normativas ambientales muy restrictivas. El nuevo trabajo, por contra, concibe un futuro capaz de mantenerse sin controles draconianos, corrobora Christopher Flavin, analista de cuestiones energéticas en el Instituto de Inspección Mundial de Washington, D.C.

No todo el mundo parece de acuerdo con el futuro pintado por Shell. Lee Schipper, del Laboratorio Lawrence de Berkeley, objeta que la empresa considera deliberadamente posibilidades muy amplias. Schipper señala que el nuevo análisis "no posee rigor suficiente para tomarlo al pie de la letra".

No obstante la fase embrionaria del estudio encabezado por DuPont-Roc y Rainbow, algunos ambientalistas se han sumado ya a la idea. Flavin sugiere que las conclusiones de Shell "desacreditan" las predicciones a la baja del Consejo Mundial de la Energía. Cree que el hidrógeno generado por electrolisis del agua usando energía de plantas fotovoltaicas será el combustible de la segunda mitad del siglo venidero.

Nadie puede leer las letras del devenir de las cosas. Pero cuando una de las más importantes empresas petrolíferas pronostica el fin de la edad del combustible fósil, quiere decir que avanzamos hacia un nuevo mundo mucho más deprisa de lo que advertimos.

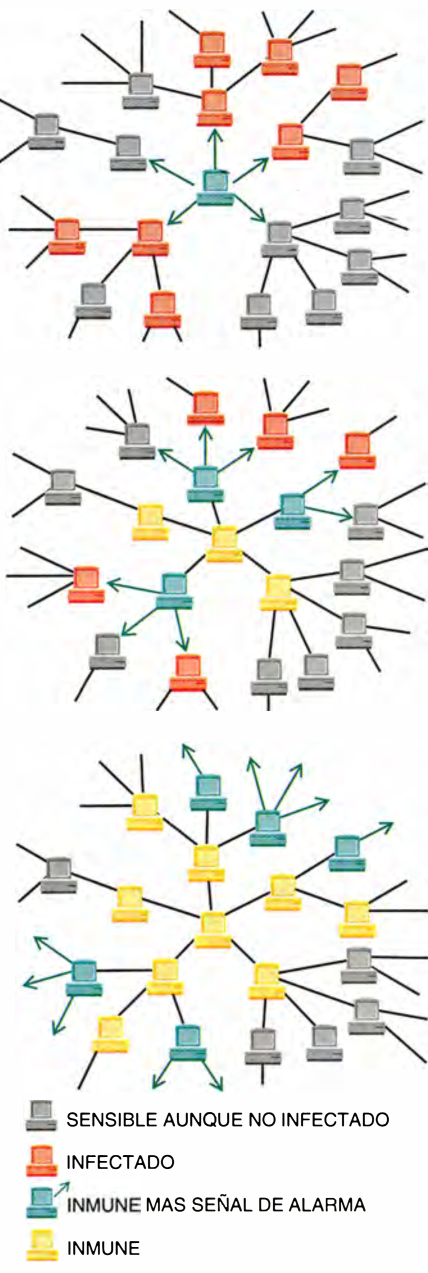
TIM BEARDSLEY

Virus informáticos

Macrófagos y vacunas

Cada día se inoculan dos o tres nuevos virus informáticos. Entre el 10 y el 15 por ciento de los más de 2500 virus que se han sintetizado alcanzan "la jungla", término que los expertos informáticos emplean para designar ese vasto y mal definido territorio electrónico donde un patógeno digital se establece para infectar otros ordenadores. Basta ese porcentaje para mantener ocupada a una industria, aunque pequeña, floreciente, que elabora programas comerciales para erradicar microbios de bits. Equipos de expertos de esas empresas analizan durante horas o días virus que llevan nombres más pacíficos (Junkie, Miguel Angel o Jerusalén) que lo que su naturaleza merece, tratando de descubrir sus señas de identidad.

Los programas antivirus constan de varios módulos que comprueban actividades sospechosas del sistema o cambios en los archivos. El paquete contiene también un procedimiento para restablecer los archivos dañados. Al explorador le corresponde otra tarea vital: descubrir virus en la memoria del ordenador o en los discos de almacenamiento mediante detección de una configuración característica de los bytes, llamada signatura. Pero si la signatura no está en la base de datos del soporte lógico del ordenador, es probable que el programa pase por alto el virus. De ahí que los usuarios de ordenadores se vean obligados a actualizar periódicamente dichos programas. Conseguir que el programa antivirus deduzca por sí mismo una signatura se ha convertido en prioridad.



Señal de alarma: avisa de la presencia de un virus y proporciona información para su reparación ulterior. La señal se envía a los vecinos por un ordenador infectado que ya se ha inmunizado a sí mismo contra una futura infección. Si no está infectado, un ordenador adyacente queda simplemente inmunizado; si está contaminado, el ordenador es inmunizado y envía después una señal de alarma a los vecinos

A principios de julio, Jeffrey O. Kephart, adscrito al Centro Thomas J. Watson, de IBM, presentó un artículo técnico sobre un método avanzado de detección de virus. El título era provocativo, aunque nada utópico: "Sistema inmunitario de raíz biológica para ordenadores".

Kephart compara la creciente dificultad de luchar contra los virus informáticos con la tarea de los centros de control y prevención de enfermedades si tuvieran que buscar un remedio contra cada nueva cepa del resfriado común. Sugiere, pues, que las medidas protectoras deben imitar la extraordinaria capacidad del sistema inmunitario de los humanos para identificar y destruir por sí mismo los organismos patógenos.

Así, elemento clave del paquete lógico de IBM lo constituye el equivalente inerte del macrófago. En el hombre, esta clase de célula captura al organismo invasor, conforma el antígeno y lo pone de manifiesto para que otras células inmunitarias lo tomen como indicador que les ayuda a identificar otras apariciones del mismo microbio.

El macrófago informático consta de un programa "señuelo", ideado de suerte tal que constituya presa fácil para el virus invasor. Una forma de atraer la infección consiste en interaccionar frecuentemente con el sistema operativo del ordenador. Al leer, grabar y copiar archivos, un programa —de hecho, una célula inmunitaria cibernética— entra y sale de la memoria a la manera en que el macrófago deambula por el organismo en busca de microorganismos extraños. A su vez, otros programas pertenecientes al sistema inmunitario de IBM inspeccionan los señuelos para determinar si han sufrido alguna alteración y pueden por tanto hallarse infectados.

Otras empresas informáticas dedicadas al diseño de antivirus emplean también señuelos. Pero, según Kephart, al paquete de IBM le distingue el presentar un programa de análisis estadístico para discernir una signatura vírica y una herramienta para saber de qué manera se enlaza el virus con los datos o programas. El detector de signaturas está capacitado para identificar la mayoría de las signaturas víricas mejor de lo que lo podría hacer un ser humano.

De momento, IBM usa su sistema inmunitario automático como herramienta para eliminar problemas de los clientes y actualizar los paquetes protectores que vende. "Este [paquete inmunitario] nos permite mantenernos al ritmo de inoculación de nuevos virus con sólo un experto, frente a la docena de analistas empleados por otros productores de programas antivirus", escribe Kephart. Sólo los más complicados gérmenes binarios requieren todavía inspección experta.

No han proliferado, hasta el presente, las epidemias de virus informáticos. La mayoría de los contagios permanecen circunscritos; la transmisión de una máquina a otra se produce generalmente por intercambio de diskettes. Pero el aumento de las redes en las oficinas e Internet están ampliando el número de vectores a través de los cuales los virus infectan múltiples ordenadores.

En respuesta, los investigadores de IBM han ideado una estrategia de vacunación y tratamiento en masa. Se envía notificación de la infección a las máquinas vecinas de una red. Además de alertar a las otras máquinas, este "mensaje de alarma" contiene información sobre la signatura del virus y proporciona instrucciones de reparación. El destinatario, a su vez, notifica a las otras máquinas si él se encuentra infectado. "El mensaje sigue la trayectoria del virus y lo detiene antes de que llegue muy lejos", expone Kephart. Durante la campaña para la erradicación de la viruela, recuerda, se recurrió a una estrategia similar. Se vacunaba a quienes habían entrado en contacto con alguien infectado.

Desde 1991 se han usado diversos elementos de este sistema inmunitario informático para obtener las signaturas de más de 2500 virus que actúan sobre los PC de IBM. La empresa se propone sacar al mercado su paquete completo de reparación antivírica. El paquete residirá probablemente en un único ordenador de la red de una oficina que mantendría la vigilancia sobre programas infectantes. Bajaría el ritmo de actualización de programas antivirus, aunque se necesitarían revisiones ocasionales para los virus más pertinaces, que escapan al escrutinio del sistema inmunitario automático.

Para Kephart, la relación entre el silicio y la inmunidad biológica trasciende la puramente metafórica. Medio en serio medio en broma, señala que el campo de la virología digital ofrece nuevas ideas para los cultivadores de la inmunología. Además, sus conocimientos pueden ser necesarios donde menos se piense: ni siquiera los rincones más aislados del mundo son inmunes a la infección. En enero se descubrió un virus llamado *barrote* en las bases científicas española y argentina en la Antártida. La inmunodeficiencia es más que una característica humana.

GARY STIX

Luz y calor

Abogados y patentes

Terminaba el año pasado cuando William H. White, subsecretario de energía de los EE.UU., anunció una de las cosas con las que sueñan los tecnócratas gubernamentales: el desarrollo con éxito de un proyecto barato cuyas consecuencias para la competitividad y el ambiente podrían ser de largo alcance. Se trataba de un trabajo de unos ochocientos millones de pesetas financiado para producir una célula fotovoltaica de alto rendimiento y bajo coste. United Solar Systems, una empresa conjunta de Energy Conversion Devices y la japonesa Canon, llevó a cabo la investigación y pagó la mitad de los costes. El Departamento de Energía (DOE) cubrió el resto. Eso era entonces. Hoy, los pleitos y contrapleitos tienen paralizado el proyecto.

Solarex, filial de Amoco, alega que sus patentes sobre la tecnología del silicio amorfo son vulneradas por el dispositivo de United Solar, que usa silicio amorfo y dos aleaciones diferentes de germanio y silicio. La célula alcanza un rendimiento de más del 20 % a un coste más bajo que el de los diseños actuales. David Carlson, actual vicepresidente de Solarex y autor la investigación original sobre el silicio amorfo en los años setenta, decidió presentar demanda.

United Solar ha replicado con una contrademanda alegando infracción de sus patentes por Solarex. Subhendu Guha, inventor de la célula de United Solar, insiste en que su concepción es el resultado de más de 15 años de investigación independiente. "Solarex", dice Guha, "está empeñada en una campaña de pleitos sobre infracción de patentes tratando de cerrar las compañías fabricantes de la célula solar de silicio amorfo que están comprometidas en la solución de la crisis de la energía en este y el próximo siglo".

Además del problema legal, los técnicos se preguntan si el DOE ha protegido adecuadamente los intereses públicos en los proyectos de investigación que respalda. James Caldwell observa que United Solar y Solarex han recibido dinero del DOE para desarrollar la tecnología del silicio amorfo. Varios fabricantes japoneses usan silicio amorfo en productos de consumo gracias a un acuerdo con RCA Corp., donde Carlson desarrolló esta substancia. Carlson se pregunta si el DOE no debería tratar de garantizar que las compañías explotaran los valiosos inventos sobre fuentes de energía que financia.

El resultado de la batalla podría ser pírrico si una célula inventada por el equipo de Martin Green, de la Universidad de Nueva Gales del Sur en Sydney, alcanza el éxito que los investigadores esperan. El grupo de Green tiene la plusmarca mundial de rendimiento en células solares en montajes de laboratorio. Además, una de las innovaciones de Green, los contactos enterrados, se emplea ya en paneles fabricados por la empresa australiana B. P. Solar. Green ha concedido licencia de la tecnología a Solarex. Los contactos enterrados, que son conectores metálicos ocultos en las células en surcos cortados por un láser, eliminan la necesidad de cables montados encima de la célula que bloquean parte de la radiación solar incidente.

La célula ideada por el grupo de Green consta de muchas capas finísimas de silicio, dopado de suerte tal que las capas de tipo p alternan con las de tipo n. Los contactos enterrados lo pemiten. Los métodos tradicionales de unir contactos no podrían utilizarse para conectar un cable a todas las capas impares (por ejemplo) en la pila multicapa de la célula. La nueva célula podría alcanzar un rendimiento del 25 por cien al coste de sólo 130 pesetas por metro cuadrado. Esto convertiría a la electricidad solar en competitiva con la producida por combustible fósil en muchas casas. Pero se calcula que pasarán diez años antes de poder convertir el montaje a escala de laboratorio en un producto comercial.

TIM BEARDSLEY

Taller y laboratorio

Kyle M. Becker

Rastreo de superficies subacuáticas

Por sorprendente que parezca, los fundamentos del rastreo de submarinos y otros objetos subacuáticos apenas han variado desde comienzos de siglo. Un procedimiento sencillo consiste en sumergir un hidrófono en el agua y captar así los sonidos. Un método menos pasivo emplea un dispositivo emisor de ondas sonoras que, al reflejarse en el blanco, producen eco. Se basa este método en que los objetos de formas, tamaños y materiales diferentes reflejan de manera distinta las ondas sonoras. Esa especie de rúbrica acústica permite a un escucha determinar si se acerca un submarino enemigo o cualquier otro objeto (*véase* "Los submarinos del Tercer Mundo", por Daniel J. Revelle y Lora Lumpe, en este mismo número). Aunque los militares cuentan con equipos electrónicos muy perfeccionados para descifrar los ecos, los principios esenciales pueden ilustrarse con un transductor elemental.

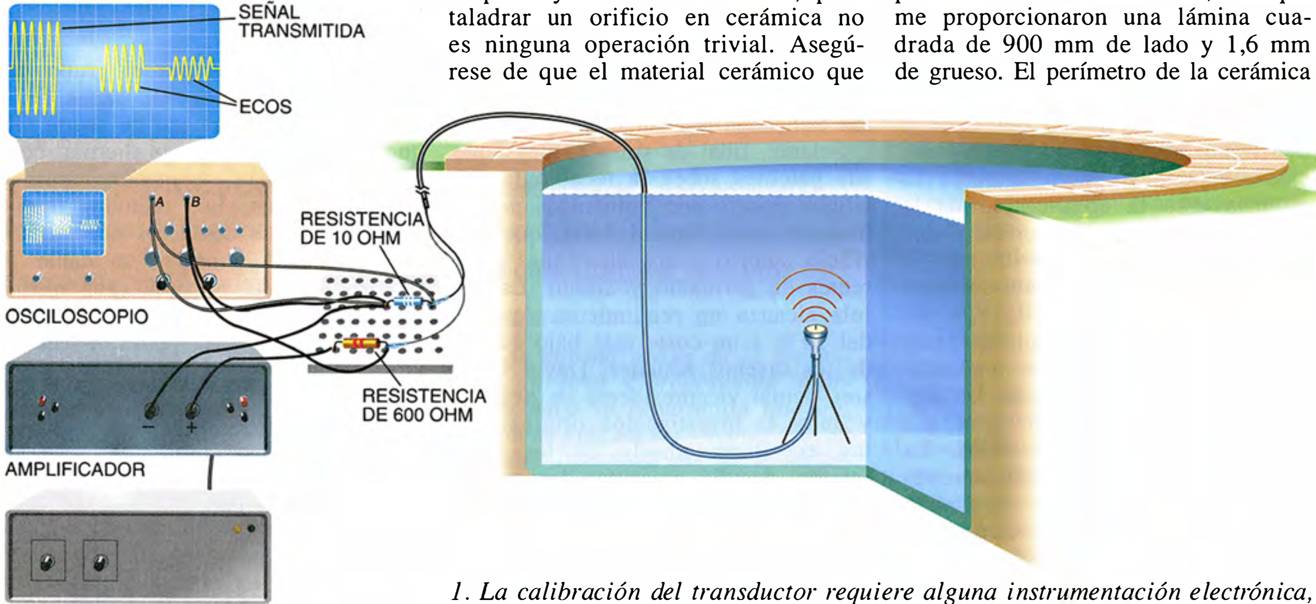
KYLE M. BECKER, graduado en ingeniería mecánica por la Universidad de Boston, está investigando el modo en que las diferencias de superficie en el lecho oceánico afectan a las señales acústicas.

El elemento básico de este transductor es una pieza de cerámica piezoeléctrica. Al ser comprimido, el material desarrolla una tensión eléctrica entre sus extremos. Y al revés, comunicando una carga a las caras, el material se flexiona. Un tensión alterna hace que la cerámica se dilate y se contraiga repetida y sucesivamente, generando una onda acústica. Por su parte, las ondas acústicas hacen que entre una y otra cara de la cerámica se desarrolle una carga alterna. Entonces, midiendo las características de la tensión eléctrica se tendrá una pista sobre la naturaleza del objeto en el que se estén reflejando las ondas acústicas.

Para ese experimento la cerámica a emplear es titanato zirconato de plomo. (Sirven tipo I Navy o Vernitrón tipo PZT-4.) Se necesita también un anillo del mismo material de unos doce o trece milímetros de grueso, cuya misión es desorganizar los patrones de vibración indeseables que se forman radialmente en el disco y que merman sus prestaciones. El disco debe tener unos 60 milímetros de diámetro exterior y unos nueve o diez de diámetro interior. Se aconseja pedir la pieza ya con forma de aro, pues taladrar un orificio en cerámica no es ninguna operación trivial. Asegúrese de que el material cerámico que adquiera esté polarizado en espesor y que tenga ambas caras plateadas.

Para construir el transductor, se conecta una pareja de hilos conductores al disco cerámico y luego montamos éste en un alojamiento adecuado, por ejemplo un tubo de fundición, que puede comprarse en cualquier ferretería o tienda de sanitarios. Yo empleé un tubo de unos 65 milímetros de largo y 13 milímetros de diámetro y un adaptador de tubos, que no es sino una pieza tubular más ancha en un extremo que en el otro. El extremo estrecho del adaptador, la cola, debe ser de 13 milímetros de ancho para que el otro tubo pueda atornillarse en él; el extremo ancho, la boca, debe tener la anchura exactamente suficiente para acomodar la cerámica. La boca de mi adaptador medía 60 milímetros de ancho. Hay que limar la superficie superior del adaptador para quitarle las asperezas; la cola se conecta luego al tubo.

Pasamos a preparar la cerámica para montarla. Empezamos por estañosoldar un hilo conductor de poca longitud a cada cara del disco. Para suprimir aún más las vibraciones indeseables de la cerámica, usamos un poco de un material corchoso y flexible, Corkprene por ejemplo. Yo empleé el de calidad DC-100, del que me proporcionaron una lámina cuadrada de 900 mm de lado y 1,6 mm de grueso. El perímetro de la cerámica



1. La calibración del transductor requiere alguna instrumentación electrónica, una piscina al aire libre y un día tranquilo. El osciloscopio presenta la señal transmitida y los ecos

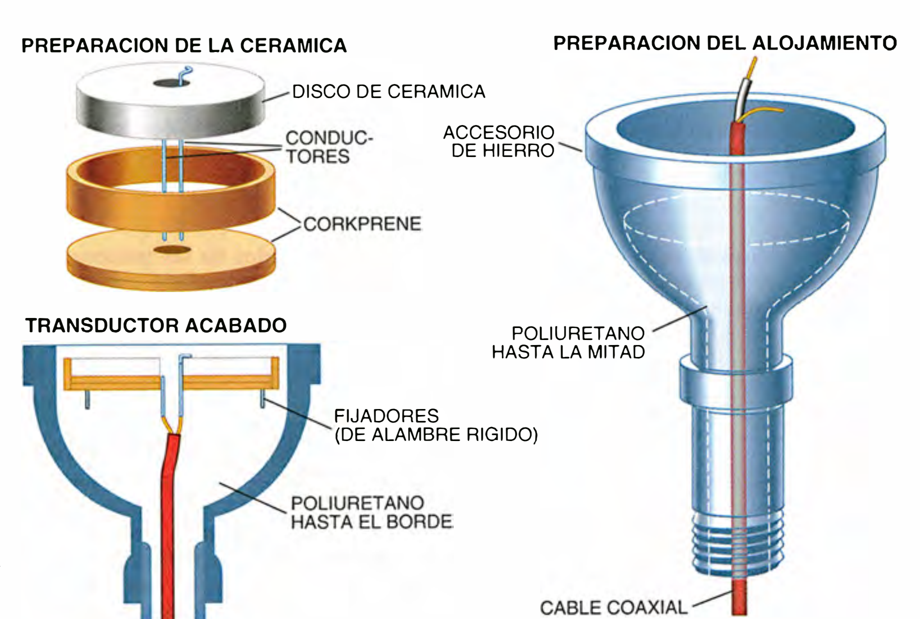
se envuelve con Corkprene y se fijan dos capas de éste a la cara posterior del disco. Para unir el Corkprene a la cerámica, utilice un adhesivo. Con los conductores y el corcho en su lugar, tiene la cerámica dispuesta para montar.

El alojamiento se prepara enhebrando un tramo de cable coaxial a través del extremo estrecho de los tubos. La longitud del cable debe ser al menos de seis metros. Tire del mismo hasta que sobresalgan unos 30 mm por encima del borde del alojamiento. Sujételo envolviendo con cinta adhesiva estanca el extremo estrecho del alojamiento. Es importante una buena hermeticidad.

Llenamos luego la mitad inferior del alojamiento con alguna sustancia de poliuretano. Para preparar el compuesto, siga las instrucciones del prospecto que suele acompañar el suministrador. Vierta lo suficiente para rellenar hasta la mitad la boca del adaptador, pero asegúrese de que deja espacio suficiente para la cerámica y el Corkprene. Una vez que el poliuretano haya fraguado (unas 24 horas), corte el cable coaxial hasta lo más cerca posible del poliuretano. El cable debe recortarse de suerte que el conductor central y el blindaje queden visibles, sin llegar a tocarse.

Inserte tres o cuatro trozos cortos de alambre rígido en el poliuretano seco. Pueden servir agujas de coser que haya cortado hasta la longitud adecuada. Esos alambres sirven de apoyo al disco de cerámica y permiten que el poliuretano fluya bajo el mismo. Colóquelos de manera que la cerámica quede plana respecto al frente del alojamiento y a unos 4 mm por debajo del borde. Con estaño suelde uno de los conductores al conductor central del cable coaxial y el otro al blindaje metálico del cable. Ponga entonces la cerámica sobre los alambres rígidos y vierta poliuretano hasta el borde del adaptador. (El poliuretano no afecta al funcionamiento de la cerámica.) Vierta poco a poco y trate de que no se formen burbujas de aire, especialmente en la cara frontal del transductor. Deje fraguar y asentarse al conjunto durante 48 horas.

Para aprovechar bien el transductor, hay que calibrarlo. Lo primero es determinar la frecuencia a la cual el transductor vibra con mayor intensidad. Ese valor, llamado frecuencia de resonancia, se calcula a partir de las dimensiones de la pieza de material cerámico. En el caso de un disco delgado dispuesto como se describe, la frecuencia de resonancia, en kilohertz, es igual a 2080 dividido por el espesor del disco en milímetros. Así, para un disco de 13 milímetros, la resonancia debe presentarse a 160 kilohertz. Para una determinación más exacta hay que recurrir a la técnica de calibración de autorreciprocidad. Este procedimiento, formalmente presentado por Robert J. Urick en *Principles of Underwater Sound*, precisa de tres instrumentos electrónicos: un generador de señales, un amplificador de señales (capaz de manejar sin distorsión altas



2. Nuestro transductor subacuático está constituido por un material cerámico piezoeléctrico alojado en tubos. Los conductores conectados a caras opuestas del material están estañosoldados al cable coaxial. Para dotar de estanqueidad al dispositivo, dentro del alojamiento se introduce poliuretano en dos etapas

Cálculo de la impedancia

La impedancia (Z) es la análoga en corriente alterna de la resistencia en los circuitos de corriente continua. Se calcula dividiendo la tensión transmitida (V) por la corriente transmitida (I); o sea, $Z = V/I$. Lo más recomendable es emplear cantidades absolutas, de modo que se pueda trabajar con números reales.

El paso siguiente es calcular el "parámetro de reciprocidad esférica" teórico (J_s), o $J_s = 2r/\rho f$. En esta fórmula, r es la distancia del transductor a la superficie del agua, la letra griega rho (ρ) es la densidad del agua (para el agua dulce, unos 1000 kilogramos por metro cúbico) y f es la frecuencia impulsora. Como la respuesta transmitida se determina relativamente a un metro, hay que hacer r igual a 1.

Ahora J_s es igual a la sensibilidad a la recepción, M_s (en volt por pascal, siendo el pascal una unidad de presión), dividida por la sensibilidad a la transmisión, S_s (en pascals por ampère a un metro); o sea, $J_s = M_s/S_s$. Para determinar M_s, puede emplearse la relación $M_s = \sqrt{(2r\,|E_r|\,J_s/I)}$. En esta fórmula, E_r es la tensión eléctrica real entre los extremos del transductor. Hay que corregirla para tener en cuenta la resistencia de 10 ohm: $|E_r| = |V_r|\,[Z/(10 + Z)]$. V_r es la tensión de retorno, que en el osciloscopio aparece como envolvente del segundo pulso.

Una vez hallada M_s, puede despejarse S_s empleando el parámetro de reciprocidad (J_s). Por último, se convierten las unidades de pascal a micropascal y de ampère a volt (empleando los valores de la impedancia del transductor). A continuación, puede determinarse la sensibilidad del transductor en decibelios:

$$M_s\ (\text{dB}) = 20 \log (M_s)$$
$$S_s\ (\text{dB}) = 20 \log (S_s)$$

El valor de M_s se entiende para un volt por micropascal y el de S_s, para un micropascal por volt en un metro.

Determinación de la intensidad de difusión

La intensidad de difusión, S, está dada por $S = 10 \log(s)$, donde s es el coeficiente de difusión determinado mediante

$$s = \frac{E[\,|E_r|^2]r^4}{|V|^2 {M_s}^2 {S_s}^2 A.}$$

$E[\,|E_r|^2]$ es el valor esperado, o medio, de los cuadrados de las tensiones ecorrecibidas, r es la distancia a la superficie y A es la superficie cubierta por el sonido del transductor. Esa superficie está dada por

$$A = \frac{\pi r^2 \sec\theta \,\mathrm{sen}^2\, \beta/2}{(\cos^2\theta - \mathrm{sen}^2\, \beta/2)\sqrt{1 - \mathrm{tg}^2\,\theta\, \mathrm{tg}^2\, \beta/2}}$$

donde θ el ángulo de incidencia y β la abertura del haz.

frecuencias) y un osciloscopio analógico de doble canal. El generador de señales debe ser capaz de funcionar en modo pulsado a frecuencias de 100 a 200 kilohertz. Aunque no pueda decirse que se trate de utensilios caseros, suelen hallarse en los laboratorios de física o ingeniería de facultades y universidades.

Es además crucial que la superficie del agua esté en calma. Una piscina cubierta, e incluso una al aire libre en un día tranquilo, bastará perfectamente. El transductor debe sujetarse a un soporte que pueda rotarse. En el laboratorio, nosotros empleamos un refinado sistema controlado por ordenador, pero el mismo cometido pueden realizarlo un trípode fotográfico y una abrazadera.

Para calibrar el transductor hay que medir las tensiones eléctricas entre una y otra cara del dispositivo y la corriente que lo atraviesa. Para ello se introduce en el amplificador la señal procedente del generador de señales. Al amplificador se conecta el transductor en serie con una resistencia de 600 ohm por delante del mismo y una resistencia de 10 ohm por detrás. Entonces, las tensiones eléctricas transmitida y recibida podrán medirse a través del transductor y verse simultáneamente en el osciloscopio. La caída de tensiones entre los bornes de resistencia de 10 ohm nos da la "corriente" transmitida. Para determinar la corriente verdadera, se saca la señal por el otro canal del osciloscopio y se divide por 10 ohm la tensión medida.

Preparado ya el circuito, el transductor se instala en el agua de modo que quede erecto a unos 300 milímetros por debajo de la superficie. El generador de señales y el amplificador se ajustan para que den ondas senoidales pulsátiles. La tensión eléctrica transmitida debe ser del orden de 20 volt entre picos (o sea, de 10 volt por encima y por debajo de cero). En el generador de señales, ajuste la frecuencia a 160 kilohertz (o al valor que haya determinado como frecuencia de trabajo del transductor) y el número de pulsos a 35. El osciloscopio deberá mostrar una señal transmitida clara de 10 volt con una longitud de 35 ciclos, seguida de un "eco" más débil de la misma duración como señal transmitida. Este eco es la primera reflexión del sonido difundido por la superficie de separación entre agua y aire. De hecho, debería haber un tren de ecos correspondientes a las reflexiones segunda, tercera e incluso cuarta. Esas reflexiones son más intensas cuando el transductor apunta hacia arriba. Para hacer mediciones, aplique al dispositivo la máxima ganancia que pueda sin distorsionar la tensión eléctrica transmitida según se ve en el osciloscopio. Anote entonces los valores de la tensión transmitida, la tensión recibida (el valor del primer pulso reflejado) y la corriente transmitida.

Estas mediciones le permitirán determinar la señal transmitida y las sensibilidades a la recepción del transductor, características que dependen de la impedancia del transductor. El procedimiento para calcular la impedancia se expone en uno de los recuadros y debe desarrollarse para un intervalo de frecuencias centrado en la frecuencia de trabajo teórica. Con los resultados determinaremos las frecuencias exactas a las que el transductor muestra máxima sensibilidad.

Para determinar la directividad, o diagrama de radiación, del transductor, hay que reajustarlo hasta la frecuencia en que presenta la máxima sensibilidad. En mi caso eran 156 kilohertz. Tras asegurarse de que el transductor apunta bien hacia arriba, tome una medida. Luego rótelo un grado o dos en un sentido, antes de hacer otra medición. Siga operando así hasta que el primer eco ya no aparezca en el osciloscopio. Reajuste el transductor hasta que vuelva a estar bien apuntado hacia arriba y repita el procedimiento completo, pero ahora rotando el dispositivo en el sentido contrario.

Un vez disponga de los datos, deberá "normalizar" los resultados. O sea, divida todas las medidas por la obtenida con el transductor apuntado hacia arriba, es decir, la correspondiente al ángulo cero. Halle el logaritmo de esas cantidades normalizadas y multiplique por 20; de este modo, habrá expresado las lecturas en decibelios. Estos valores llévelos al eje y de una gráfica sobre cuyo eje x habrá colocado los ángulos bajo los cuales se hicieron las lecturas. (Adviértase que los valores en decibelios salen negativos, por lo que el cero debe situarlo en el extremo superior.) Debe así resultarle una curva de forma más o menos acampanada, con el máximo situado en el ángulo cero. Busque entonces los puntos de la curva situados a seis decibelios bajo cero; el ancho que abarque la curva revela el ancho de haz efectivo.

Establecidas las características operativas del transductor, podrá emplearlo para diversos fines. Podrá determinar la posición de un objeto de grandes dimensiones buscando sus ecos. Para ello, multiplique el tiempo transcurrido entre los pulsos transmitido y recibidos por la velocidad del sonido en el agua (unos 1500 metros por segundo); hallará así la distancia a la que se encuentra. Si el blanco estuviera moviéndose, tendrá que hacer esta operación varias veces para trazar su rumbo respecto al transductor.

¿Cómo difunden las ondas sonoras distintas superficies? Para averiguarlo, sugiero empezar por las señales difundidas desde el fondo de una piscina. Muchas piscinas al descubierto poseen un fondo arenoso con un revestimiento especial transparente al sonido. Otra superficie de buenas características podríamos encontrarla en una piscina excavada, cuyo fondo suele ser de cemento rugoso.

Haga al menos 100 mediciones independientes cada vez, rastreando la superficie con el transductor colocado a una distancia y bajo un ángulo conocidos respecto del fondo. A continuación tendrá que manipular estadísticamente los datos, según se indica en el recuadro oportuno. Cada clase de superficie produce su propia curva característica y el libro de Urick ofrece varios ejemplos. Con esa información y el transductor que se haya construido, podrá deducir la naturaleza del fondo que oculten masas de agua de hasta por lo menos 30 metros de profundidad.

Juegos matemáticos

Ian Stewart

La conjetura de Seifert es falsa

Archibald, gusano de tierra, se repantigó en su sofá nuevo, el más grande que finalmente logró hacer pasar por el codo del pasillo, que formaba ángulo recto. El sofá nuevo no se parecía nada al viejo, que se le amoldaba al cuerpo como una segunda piel, pero que Maud, su esposa, había tirado a pesar de que sólo tenía veinte años, so pretexto de que el asiento estaba hundido, de que estaba lleno de manchas y de que el relleno se le escapaba por ciertos agujeritos... Lo cual le recordó que no habían vuelto a encontrar el ejemplar de *Guerra y paz*, que un día se coló por uno de estos agujeros...

"¡Vaya día!", se lamentó Maud. "Archibald, recuérdame que nunca más vuelva a viajar por la superficie. ¡Todos esos pájaros lo están haciendo de un peligroso...! ¡He tenido incluso que sacudirle con el paraguas a un gorrión sinvergüenza!" Hizo una pausa para tomar aliento. "Y menos mal que he llegado a tiempo de ver el pronóstico meteorológico. Anda, enciende la tele."

"¿Quieres mirar las previsiones meteorológicas?", preguntó Archibald, asombrado. "Pero si nosotros nunca..."

"La galería local de la Asociación Vermejo (paradójicamente, las asociaciones de gusanos no tienen secciones) está organizando una parrillada de rododendros el martes que viene y quiero asegurarme de que no habrá viento que pueda apagar el fuego. ¡Y mira, la tía Helmintia ha donado un precioso pasamontañas bordado para la subasta!" Maud le mostró un objeto grotesco adornado con lacitos de color malva muy pálido y bordes en naranja degradado, que le hizo pensar en un calcetín agujereado. "¡Vamos, Archibald, a ver si enciendes la tele de una vez!"

Archibald se estiró horizontalmente y pulsó el botón. Se produjo un fuerte chispazo y se fundieron todos los fusibles de la galería. Su gusanija Vermencita, que dormía en su cuarto, se despertó y se echó a llorar. Maud, en la oscuridad, trató de calmarla.

Media hora más tarde, Archibald diagnosticó que el receptor estaba seriamente averiado y telefoneó a un técnico.

"Puuouufuuf...", resopló la voz del otro extremo del hilo. "Tiene pinta de resultar caro. Vamos a ver... Sí, les veré de este jueves en ocho días. Hasta la vista."

Maud no estaba nada satisfecha.

"Verás", dijo Archibald en su desesperación. "De una cosa puedes estar segura sin ver el tiempo, y es que en alguna parte no habrá viento."

"¿Será aquí?"

"No tengo ni idea, amor mío. Sé que ocurrirá en alguna parte. En Sidney, en la Tierra del Fuego o quién sabe dónde."

"Archibald, corta con las bobadas. Es verosímil que en alguna parte no haya viento. Pero, ¿cómo puedes estar seguro de ello sin ver la previsión? Te pasas la vida haciendo creer que sabes más de lo que verdaderamente sabes."

"En algún punto de la superficie de la Tierra no habrá viento, o más exactamente, la componente horizontal del viento será nula. Si sopla, tendrá que ser verticalmente, sea hacia arriba o hacia abajo."

"Archibald, cada vez que abres la boca lo pones peor. Y en todo caso, ¿dónde se encuentra esa calma inesperada?"

"Ni flores", confesó Archibald.

"Vale", rezongó su esposa con fastidio. "Sabes que no hará viento en algún sitio, pero no tienes ni idea dónde."

"Así es. Es una consecuencia del teorema de la bola peluda."

"¿Del qué...?"

"Imagina una bola recubierta de pelo, y supón que deseas peinar sus cabellos de forma que éstos queden lisos sobre la superficie, sin raya; es decir, que la dirección de los cabellos varíe continuamente, sin cambios bruscos."

"Imaginado. ¿Y con eso qué?"

"Que la imaginación te falla, ángel mío, porque es imposible. O bien les haces raya, o bien al menos uno de los cabellos va a sobresalir de punta" (*véase la figura 1a*).

"¿Cómo puedes estar tan seguro?"

"Es un teorema de topología. Ya sabes, la geometría de una lámina de goma."

"Archibald, estamos hablando de meteorología, y ahora me sales con bolas peludas y láminas de goma."

"Aunque mal, estoy tratando de expresar un concepto importante. La topología se ocupa de las propiedades de las figuras que no cambian cuando sometemos la figura a deformación continua. Es lícito doblarla, curvarla, estirarla y comprimirla, pero no lo es cortarla ni romperla. El teorema de la bola peluda es una verdad topológica."

"Ya...", concedió Maud sin la menor convicción.

"Por el contrario, podemos 'peinar con lisura' un toro peludo", añadió Archibald (*véase la figura 1b*).

"¿Un toro? ¿Vas a peinar un toro?"

"Bueno, un toro es una superficie como la de una rosquilla."

"Pues no vas a encontrar rosquillas peludas en mi casa", dijo Maud con tono ufano. "A mi Vermencita sólo le conviene lo mejor y lo más fresco."

1. No es posible peinar una bola peluda sin hacerle rayas o remolinos (a). Un toro sí puede quedar bien peinado

"Naturalmente, este problema topológico se vuelve más interesante en dimensiones superiores", dijo Archibald a la desesperada. "Por ejemplo, se puede peinar sin remolinos una esfera peluda n-dimensional siempre que n sea impar; eso, en cambio, es imposible si n es número par."

Maud le lanzó una mirada extraña. "Archibald, veo que cada vez desbarras más. ¿Qué es eso de una esfera n-dimensional? Una esfera es una esfera, ¿o no? Yo diría que es tridimensional, como todas las cosas."

"Ah, no. Una esfera es bidimensional, ¿no te parece? Es decir, la superficie de una esfera es bidimensional", se apresuró a matizar. "Bastan dos coordenadas —la longitud y latitud, por ejemplo— para localizar cada uno de los puntos de la esfera. Por eso los topólogos las denominan '2-esferas'. La figura análoga en una dimensión, o sea, la 1-esfera, es una circunferencia. Y hay una figura análoga cualquiera que sea el número de dimensiones. En un espacio tridimensional podemos representar una 2-esfera mediante el conjunto de puntos situados a una misma distancia del origen; a una unidad, por ejemplo. Algébricamente, esa esfera es entonces el conjunto de puntos cuyas coordenadas (x, y, z) son tales que $x^2 + y^2 + z^2 = 1$. De igual manera, una esfera de un espacio de $(n + 1)$ dimensiones es el conjunto de puntos situados a la misma distancia —de una unidad, por ejemplo— del origen. En su descripción algebraica, se trata del conjunto de puntos de coordenadas $(x_1, ..., x_{n+1})$ que verifican la ecuación $x_1^2 + ... + x_{n+1}^2 = 1$."

"¿Y cómo se hace para visualizar tal dechado de imaginación matemática?"

"Empecemos con una 2-esfera. Si eliminamos uno de sus puntos y la 'aplanamos' —por ejemplo, mediante una proyección estereográfica— se tiene un plano (*véase la figura 2*); el punto que falta va a parar 'al infinito'. Podemos, a la inversa, representar una 2-esfera mediante un plano al que se le añade un único 'punto del infinito', situado en el 'extremo' de cada radio que parte del origen del plano. Por analogía, podemos imaginar una 3-esfera como espacio tridimensional ordinario, más un punto adicional excepcional 'en el infinito', que pertenece a todas las rectas que parten del origen."

"¡Vaya lío!"

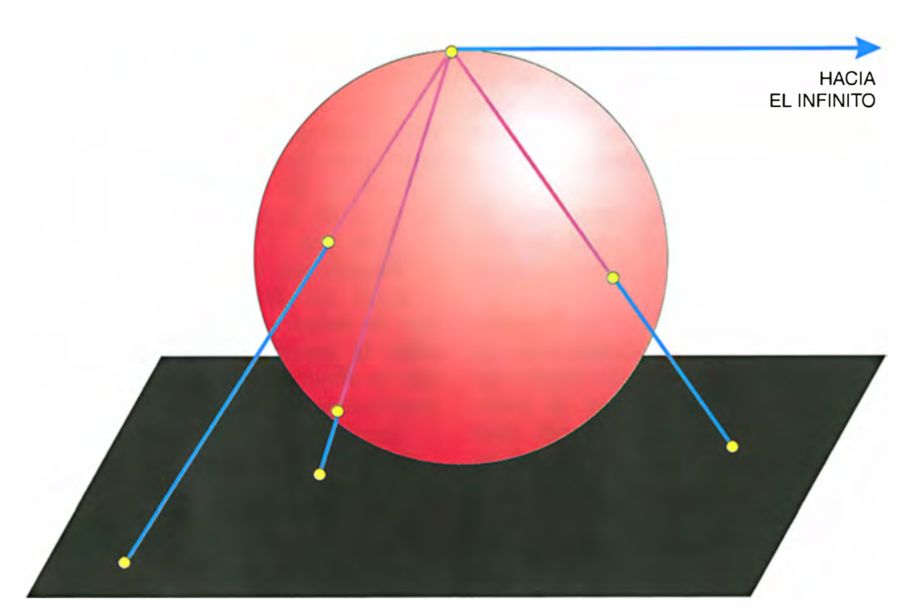
"Ahora ya podemos peinar de forma lisa una 3-esfera peluda", perseveró Archibald. "Es decir, queremos llenar la 3-esfera de cabellos que se alineen 'casi paralelamente' a los cercanos. Tomemos, por ejemplo, una sección transversal que se parezca a una recta, más un punto individual y un conjunto de espirales que parten en espiral del punto y van a acumularse a lo largo de la recta. Te la voy a dibujar en esta servilleta de papel" —dijo él, asiendo un objeto plano que apenas alcanzaba a ver con el rabillo del ojo (*véase la figura 3a*). "Haz girar esta figura usando la recta como eje de rotación: el eje definirá una recta, el punto describirá una circunferencia y las curvas espirales toda una familia de superficies espiroides. Peinas luego los cabellos de cada una de estas superficies como en el caso del toro, pero llevando los cabellos desde la vertical, cuando estés cerca del eje, hacia la horizontal, cuando estés cerca de la circunferencia (*véase la figura 3b*). Todo queda dispuesto con regularidad, sin que ningún pelo quede obligado a sobresalir hacia el exterior de la 3-esfera."

"Pero eso no podría ser, puesto que están dentro de la esfera..."

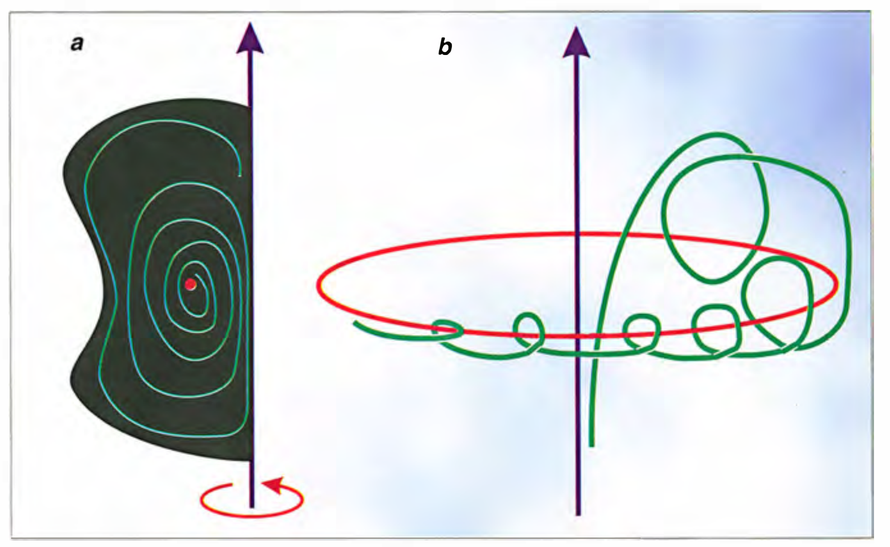
"Lo que quiero decir es que ninguno de los pelos del interior de la 3-esfera está obligado a tener longitud nula."

"¡Ah!" Maud estudió el dibujo. "¿Y no se podría hacer sin el eje y la circunferencia?"

"No lo sé", dijo Archibald. "¿Se



2. La proyección estereográfica (entre otras) pone en correspondencia los puntos de un plano con los de una 2-esfera, si en ésta se elimina el polo Norte. Cabe, pues, imaginarse una 2-esfera como un plano más un "punto del infinito", que correspondería al suprimido polo Norte



3. Un flujo en el seno de una 3-esfera, que sólo tiene dos bucles cerrados. A la izquierda, una sección transversal de las superficies espiroides; a la derecha, una línea de corriente típica

podrá peinar una 3-esfera peluda sin que ninguno de sus pelos haya de tener longitud nula y sin bucles cerrados? Una cuestión interesante."

"Bueno, mira, ve pensando en todo eso mientras llevas el pasamontañas a la lavandería, porque lo has llenado de garabatos. Sí, ya sé que pensaste que era una servilleta."

Archibald se dirigió a la lavandería más próxima. ¿Por qué sería tan bocazas? Introdujo el objeto de la tía Helmintia en la máquina de lavar y vertió en ella el contenido de una caja de jabón en polvo. Cuando a Maud se le metía algo en la cabeza, más valía darle satisfacción. Se puso a garrapatear distraídamente sobre la caja de detergente, tratando de imaginar la forma de peinar una 3-esfera sin crear bucles cerrados.

Fue en vano.

De repente, una voz familiar retumbó en sus oídos. "¿Qué pasa, Archibald? ¿Algún inconveniente?"

"¡Albert!" Era Albert Vermenstein, un empleado de la Oficina de Patentes de la localidad. Albert era muy diestro en problemas de esta clase. Archibald se lo explicó.

"Hombre, es una cuestión célebre, planteada en 1950 por Herbert Seifert, de la Universidad de Heidelberg, hoy conocida por conjetura de Seifert", explicó Albert, lleno de animación. "El problema resulta más fácil de comprender si en lugar de con cabellos lo planteamos con 'flujos' o 'corrientes'. Imaginemos que la 3-esfera se encuentre llena de un líquido en movimiento; las líneas de flujo son las curvas que se obtienen al seguir la trayectoria de las moléculas del líquido. O bien, si lo prefieres, imagina que el espacio tiene una estructura veteada, como la madera, en la que las vetas corresponderían a las líneas de flujo. La mayoría de estas líneas van de acá para allá de formas complicadas, algunas incluso llegan a cerrarse sobre sí mismas. Como le has dicho a Maud, no es difícil encontrar un flujo que sólo tenga dos bucles cerrados. ¿Y ella quiere saber si se puede encontrar algún flujo en el que no se forme ningún bucle?"

"Exactamente."

"O sea, con otras palabras, ¿es cierto que todo flujo regular (sin puntos fijos) en el seno de una 3-esfera posee necesariamente una línea de flujo periódica, cuando menos?"

"Esa es la cuestión."

"Estás de suerte, amigo mío. La respuesta es negativa."

"¿De verdad?"

"Así es. Este resultado negativo ha sido anunciado recientemente por Krystyna Kuperberg, de la Universidad de Auburn en Alabama. A decir verdad, la primera indicación de que la conjetura de Seifert tiene respuesta negativa fue descubierta por Paul Schweitzer, de la Universidad de Harvard, en 1974. El ejemplo de Schweitzer era 'liso' en el sentido de que las direcciones de las líneas de corriente encajaban coherentemente entre sí, pero no era 'muy liso'; esto es, las tasas de variación de esas direcciones podían cambiar muy abruptamente. En términos más técnicos, su sistema era sólo 'una vez diferenciable'. Después, Jenny Harrison, de la Universidad de Warwick, encontró un ejemplo que era 'tres veces diferenciable'. Pero el ejemplo de Kuperberg, muy reciente, es *infinitamente* diferenciable, esto es, todo lo liso y suave que puede ser. Además, su demostración entraña una idea nueva y muy notable, que cambiará la faz de la dinámica en dimensiones superiores."

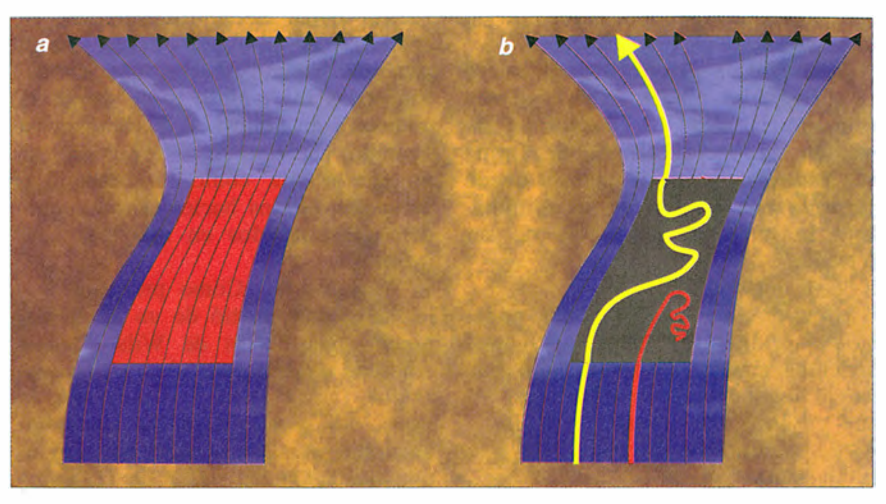
"Lo mejor será que me expliques de qué se trata."

"Haré lo más que pueda", prometió Albert. "¿Has echado bastante detergente?"

"Buena idea," dijo Archibald, vaciando el contenido de otra caja.

"Como sabes, podemos visualizar una 3-esfera mediante el espacio usual, con tal de que no olvidemos el punto adicional 'en el infinito' cuando sea relevante. En nuestro caso, el papel principal de este punto consiste en prohibir que todas las líneas de corriente apunten en la misma dirección. En el espacio ordinario se obtendría así un flujo liso y carente de bucles cerrados. ¡Pero con el punto del infinito, las líneas de corriente se cierran sobre sí mismas!"

"Ya entiendo."



4. Inserción de un tapón en un flujo, con el fin de modificar la topología de las líneas de corriente

"Con tal de que entiendas el papel de este punto, puedes limitarte a considerar flujos en el espacio tridimensional ordinario y olvidar el punto del infinito. Ahora bien, todos los métodos de abordar este problema se fundan en una misma idea: la introducción en el flujo de un 'tapón' con el propósito de modificarlo y de eliminar un determinado bucle cerrado. Localmente, un flujo consiste en un haz de líneas de corriente casi paralelas (*véase la figura 4a*). Se puede entonces recortar una gavilla de líneas y reemplazarlas por una estructura más complicada (*véase la figura 4b*): piensa en las vetas de una tabla, si eso te es de ayuda. La sección transversal de esa gavilla puede ser complicada; lo más típico es que sea una corona circular (la región limitada por dos círculos) o algo por estilo, con lo que se formará una especie de tubo de líneas, hueco y corto.

"Estos flujos más complicados se denominan *tapones* si verifican dos condiciones sencillas. Por una parte, el tapón ha de *concordar*: si el tapón es atravesado de uno a otro extremo por una línea de corriente, los puntos de entrada y de salida de ésta tenían que haber estado unidos en la corriente inicial por una sola línea de flujo. Por otra parte, alguna línea de flujo ha de quedar *atrapada* en el interior del tapón, esto es, ha de penetrar en él, pero no ha de salir jamás. Tiene que enroscarse y zigzaguear dentro, como un hilo de longitud infinita atrapado en una caja" (*véase la figura 4b*).

"Me parece que lo voy entendiendo", dijo Archibald. "Oye, Albert, ¿recuerdas si ya he puesto detergente?"

"Me parece que no", respondió Al-

bert, más que distraído, embebido en su tema.

Archibald vació otro tambor entero en su máquina. "Vale, Albert; ya voy cogiendo la idea. Al insertar un tapón en un bucle cerrado, de forma que éste penetre en el tapón y quede atrapado en él, el bucle es eliminado... la línea de flujo deja de ser cerrada."

"Exactamente."

"Con dos de estos tapones podemos suprimir dos bucles. Así que podemos empezar con un flujo que tenga dos bucles cerrados, como el que yo encontré, y eliminar ambos."

"Pero... ¿no ves la pega?"

"Pues no."

"Al introducir dos tapones se puede crear un bucle cerrado *nuevo*."

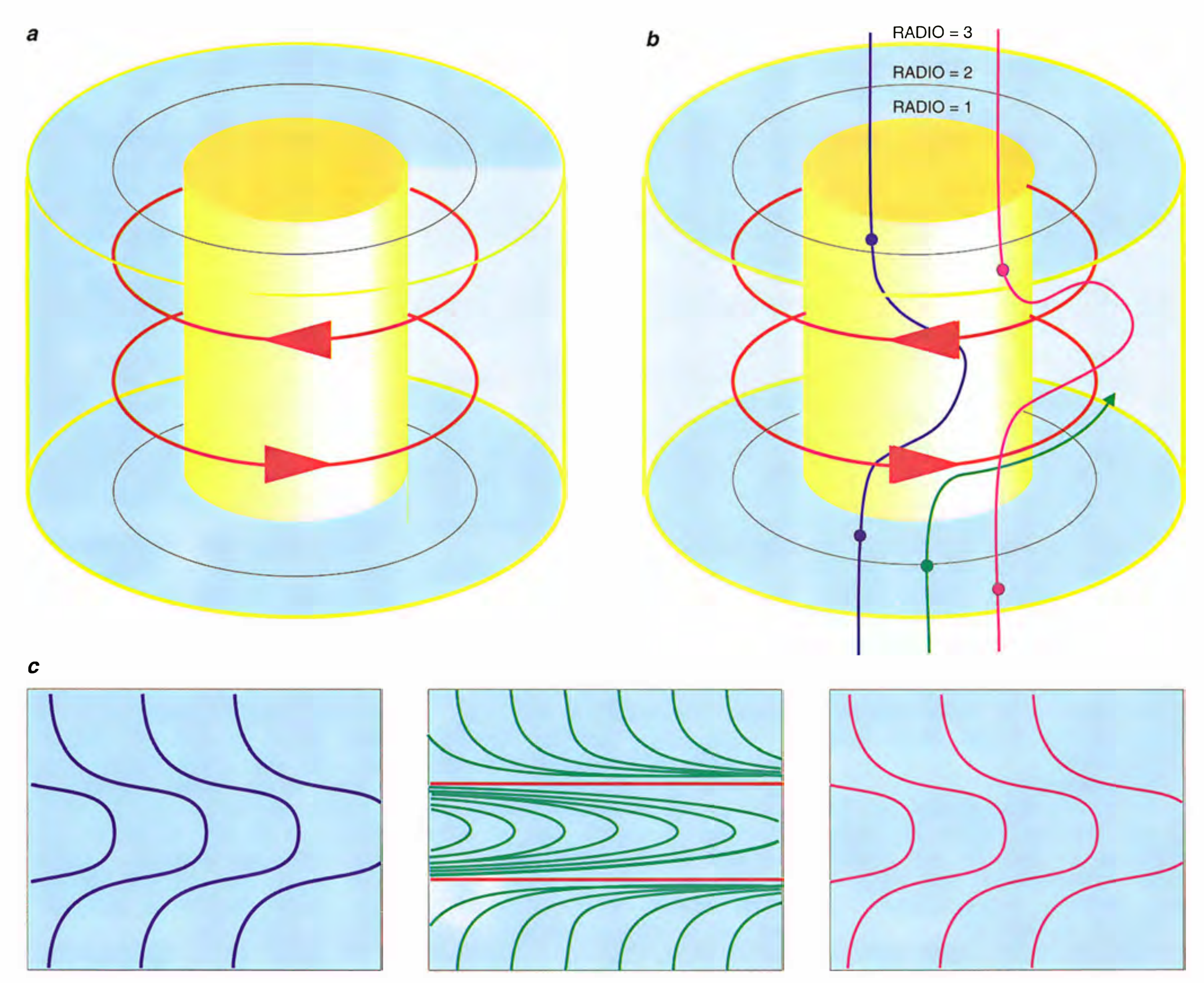
"¡Ah! Pero la condición de concordancia impide la creación de bucles nuevos que pasen al exterior del tapón."

"Sin duda. Pero, ¿qué impide su aparición en el interior? Esa era la principal dificultad con que chocaban todas las tentativas de zanjar la conjetura de Seifert. Kuperberg la ha vencido haciendo que el tapón 'se muerda la cola' como una pescadilla, de suerte que los bucles cerrados queden allí atrapados en una regresión infinita."

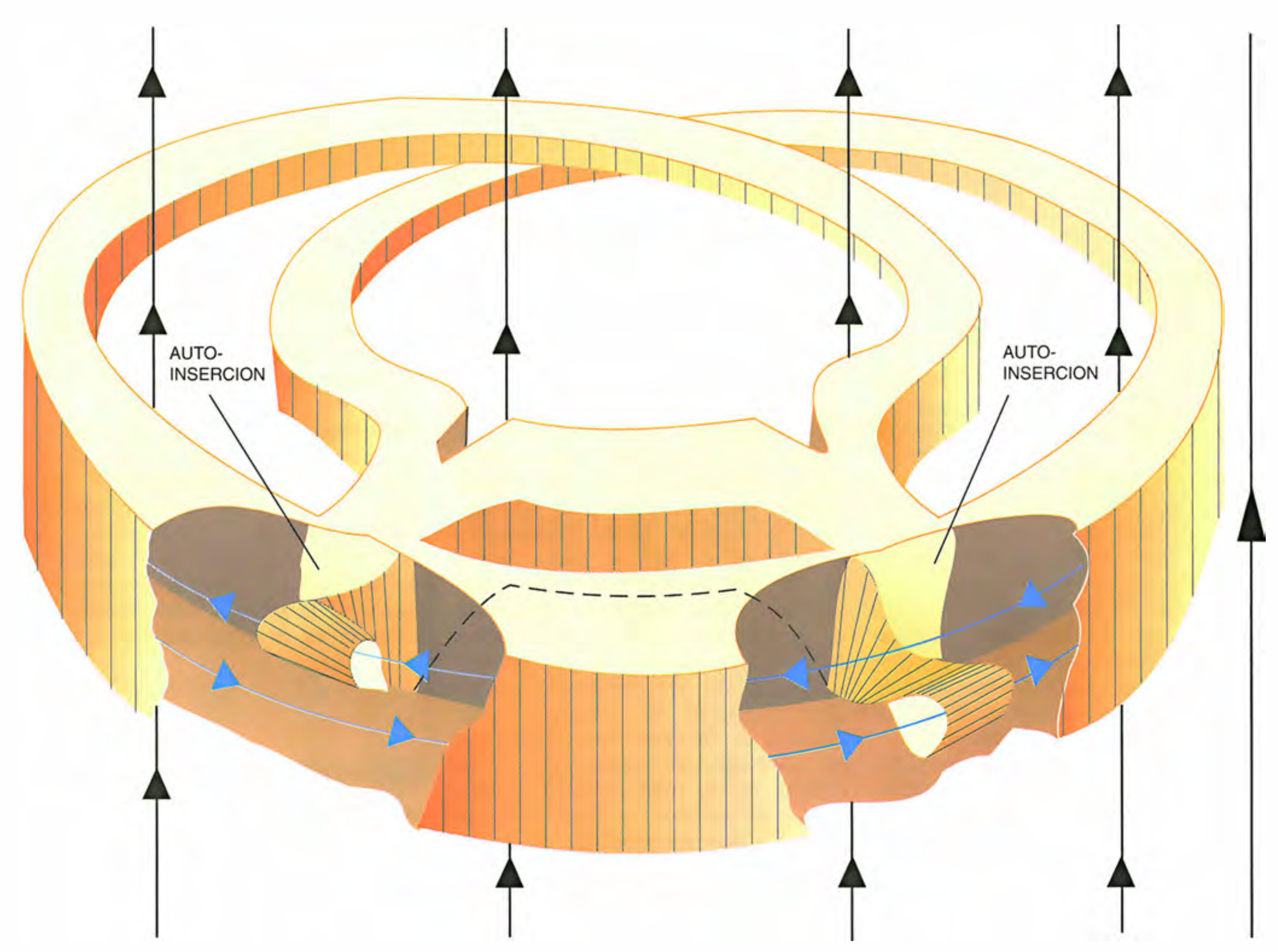
"Muy sagaz. ¿Cómo procedió?"

"Kuperberg partió de un tapón conocido por 'tapón de Wilson', que contiene exactamente dos bucles cerrados (*véase la figura 5a*). En la figura 5b se muestran las líneas de corriente en el interior del tapón, que dependen del valor de la 'coordenada radial' r, que mide la distancia desde el eje de los círculos. Cuando deformamos el tapón para insertarlo en un flujo, se considera que estas coordenadas se deforman con él, un detalle técnico que tendrá importancia más adelante. Supongamos que los radios interior y exterior sean respectivamente iguales a 1 y a 3. Los dos bucles cerrados se encuentran en la sección cilíndrica de radio r igual a 2. En la figura 5c están representados, vistos en planta, los flujos sobre diversos cilindros. Todas las líneas de corriente que entran a una distancia r igual a 2 quedan atrapadas, arrollándose cada vez más cerca del círculo superior. Todas las demás líneas de corriente vuelven a escapar. El flujo presenta simetría de arriba abajo, con lo que se cumple automáticamente la condición de concordancia.

"Kuperberg tomó uno de estos tapones de Wilson", prosiguió Albert, "y lo modificó para eliminar esos dos bucles cerrados, insertando dos partes del tapón en sí mismo, retorciéndolo de manera que las líneas de flujo encajen unas con otras (*véase*



5. Geometría de un tapón de Wilson. En (a)*, dos líneas de corriente cerradas (*en rojo*). En* (b) *se muestran algunas líneas de corriente en el interior del tapón. En* (c) *vemos líneas de corriente sobre cilindros concéntricos de distintos radios. Los cilindros han sido desarrollados para mayor claridad*



6. La modificación del tapón de Wilson propuesta por Kuperberg utiliza dos autoinserciones para suprimir los bucles cerrados

la figura 6). Un cuidadoso control del proceso garantiza no sólo la eliminación de los dos bucles, sino que se evita la creación de bucles nuevos. La idea consiste en hacer crecer la coordenada r en toda línea de flujo a partir del punto de penetración en el tapón, exceptuado un único punto de entrada ubicado a distancia r igual a 2. Un bucle cerrado tendría que vagabundear de forma complicada e incidir en el tapón más de una vez; pero como su coordenada r crece sin cesar, no puede volver a salir (pues ello exigiría que r decreciera hasta el valor de la primera entrada). La única línea de corriente en la que falla tal razonamiento es la que hace entrada en el punto especial con r = 2. Nos aseguramos de que la línea que entra allí sea uno de los dos bucles cerrados del tapón de Wilson. De esta forma, merced a una 'contabilidad' matemática cuidadosa, se garantiza la no creación de bucles nuevos en el interior del tapón. Las curvas 'atrapadas' obtenidas se arrollan indefinidamente en el interior del bucle de una forma complicada, caótica, pero todo encaja perfectamente, con 'lisura'."

"¡Albert, es genial! Lo único que falta hacer ahora es... glubglubglub."

"Perdona, ¿cómo has dicho?"

"Digo... glubglubglub."

"¿Tú dices... glubglubglub?"

"Así es... Pero... ¿de dónde sale toda esta... glubglubglub... espuma?", preguntó Archibald, mientras ambos, flotando en ella, eran arrastrados hacia la calle.

Varias horas después, de vuelta a casa, Archibald le explicó a Maud, escéptica, la solución negativa de Krystyna Kuperberg a la conjetura de Seifert.

"O sea que has vuelto a ir de copas con ese tal Vermenstein."

"Bueno, pues ya que lo dices, sí... me lo encontré en la lavandería y después nos pasamos por *El agujero de gusano* para tomar una limonada rápida. ¡No sabes el calor que hacía en la lavandería! Y Albert te envía esta botella de guscava. Aquí la tienes."

"¿De verdad? ¡Qué detalle!", dijo Maud, aplacada. "Es muy considerado... Humm, tiene todo el buqué del mantillo... Y el pasamontañas de tía Helmintia, ¿ha quedado bien limpio?"

"Limpio... sí", dijo Archibald.

"Déjamelo ver."

Archibald, de mala gana, lo extrajo del bolsillo.

"Sí, no cabe duda de que está limpio. Pero se ha vuelto muy pequeño."

"Es que ha encogido", dijo Archibald humildemente.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

A C∞ COUNTEREXAMPLE TO THE SEIFERT CONJECTURE IN DIMENSION THREE. Krystyna Kuperberg, Preprint, Mathematics Department, Auburn University, Alabama, 1993.

COUNTEREXAMPLES TO THE SEIFERT CONJECTURE AND OPENING CLOSED LEAVES OF FOLIATIONS. P. A. Schweitzer, en *Annals of Mathematics*, n.º 100, págs. 386-400, 1974.

ON THE MINIMAL SETS OF NON-SINGULAR VECTOR FIELDS. F. W. Wilson, en *Annals of Mathematics*, n.º 84, págs. 529-536, 1966.

Libros

J. E. Beckman y Luis Alonso

Cosmología

Origen de los elementos

ORIGIN AND EVOLUTION OF THE ELEMENTS. Dirigido por N. Prantzos, E. Vangioni-Flam y M. Casse. Cambridge University Press; Cambridge, 1993.

El libro *Origin and Evolution of the Elements* es el resultado de un congreso organizado en París en 1992 para celebrar el sexagésimo aniversario de Hubert Reeves, físico canadiense que ha realizado contribuciones fundamentales para el progreso de nuestro conocimiento sobre la presencia y las abundancias de los elementos ligeros en el universo.

La idea de que las reacciones nucleares con rayos cósmicos debieron desempeñar un papel clave en la producción de núclidos de Li, Be y B fue esencialmente suya, y partiendo de esta idea seminal han surgido de sus manos y de las de sus discípulos y colaboradores muchos trabajos notables sobre la evolución galáctica y la cosmología. Además, se adentró en el campo de la nucleosíntesis en una época en la que el mundo estaba todavía poblado por los gigantes, cuando Fowler, Hoyle, los Burbidge y Salpeter se afanaban en la búsqueda de los procesos que han dado lugar a los elementos, utilizando una combinación de técnicas teóricas, experimentales y observacionales. Entre los años cincuenta y setenta se demostró que las propiedades reactivas de los núcleos (explorables y medibles directamente en el laboratorio y en el acelerador) proporcionan las herramientas para explicar la producción de los elementos químicos. Poco a poco se revelaron los papeles de los distintos tipos de supernovas, así como de las estrellas en fases más equilibradas, cuyos productos se escapan mediante vientos estelares y expulsión de envolturas.

En el simposio de homenaje a Reeves, había físicos nucleares, expertos en astrofísica nuclear y en las propiedades y el origen de los rayos cósmicos, observadores de las abundancias estelares e interestelares y cosmólogos. Pese a ello, he encontrado el libro algo decepcionante. Ocurre así cuando el editor debe acomodar contribuciones de dispar naturaleza: propias de una revista especializada, exposiciones menores y "posters". Los homenajes dan abrigo incluso a los relatos biográficos. Lo habitual ante tal mezcolanza es conceder mayor extensión a los textos de investigación que a las comunicaciones, sin regatear espacio para las emociones nostálgicas. El resultado puede suponerse.

Encontramos aquí un grupo valioso de artículos hondos: sobre fraccionamiento de los elementos expulsados de la atmósfera del Sol, de Jean-Paul Meyer; concentración de los isótopos del H y del He producidos en la gran explosión, de Johannes Geiss; medidas de las abundancias estelares y su aplicación a la comprobación de las teorías de la nucleosíntesis estelar, de David Lambert, y síntesis de los núclidos más pesados que el hierro, de Marcel Arnould y K. Takahashi.

La revisión de David Schramm sobre nucleosíntesis primordial cubre un terreno tratado en buena parte en artículos anteriores. La aportación de Nikos Prantzos y sus colaboradores sobre la producción de los elementos Li, Be y B, mediante los procesos de rayos cósmicos, aunque es un resumen medido, se ha visto superada por un artículo más completo publicado luego en *Astrophysical Journal* por los mismos autores.

Los artículos cortos sirven para definir un campo de investigación más que para exponer un tema particular. Se cobijan bajo las siguientes secciones: datos nucleares y estelares, producción de los elementos ligeros en la gran explosión y por rayos cósmicos, historia del litio, nucleosíntesis hasta el pico del Fe, elementos más pesados que el Fe, evolución de la galaxia y cosmocronología, anomalías isotópicas. Por razón del espacio, la mayoría de las comunicaciones breves son pobres.

Audouze y Salpeter recuerdan retazos de la vida y la obra de Hubert Reeves, quien, a su vez, aporta un largo testimonio autobiográfico y cuenta su compromiso con los problemas de la producción de los elementos ligeros. Se trata de un artículo que merece la pena leer, por cuanto no se limita a los meros descubrimientos, sino que presenta también el proceso de descubrimiento. Destacaría dos aspectos: la historia de su contribución al conocimiento del papel de los rayos cósmicos en la producción de Li, Be y B, e historia de "la gran explosión inhomogénea" (modelo en que prentendía ajustar la concentración de elementos ligeros —D, ^{3}He, ^{4}He, ^{7}Li— con un universo cerrado por sus bariones). Hipótesis que se ha hecho insostenible tras la medición del Be y B en las estrellas más antiguas de la galaxia. Reeves sabe reconocer sus propios errores. (J. B.)

Química

Palabra y objeto

THE ENLIGHTENMENT OF MATTER. THE DEFINITION OF CHEMISTRY FROM AGRICOLA TO LAVOISIER, por Marco Beretta. Science History Publications; Canton, 1993.

A NEW COURSE IN CHEMISTRY. LAVOISIER'S FIRST CHEMICAL PAPER, por Marco Beretta. Leo S. Olschki; Florencia, 1993.

FROM CHEMICAL PHILOSOPHY TO THEORETICAL CHEMISTRY. DYNAMICS OF MATTER AND DYNAMICS OF DISCIPLINES, 1800-1950, por Mary Jo Nye. University of California Press; Los Angeles, 1993.

THE WORLD OF PHYSICAL CHEMISTRY, por Keith J. Laidler. Oxford University Press; Oxford, 1993.

THE QUIET REVOLUTION. HERMANN KOLBE AND THE SCIENCE OF ORGANIC CHEMISTRY, por Alan J. Rocke. University of California Press; Berkeley, 1993.

Uno de los temas que demandan atención más perentoria en cualquier campo de la historia de la ciencia es el concerniente a la nomenclatura básica, la que designa sus conceptos nodales en el curso del tiempo. De la reforma de la nomenclatura química acometida por Lavoisier nació la

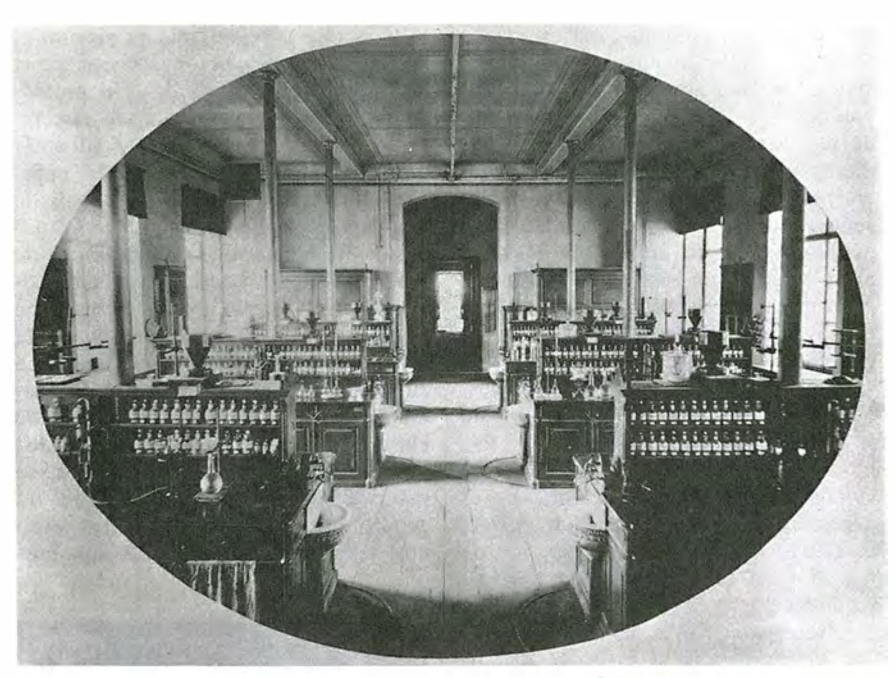
revolución de esa disciplina en el siglo XVIII.

Como todas las revoluciones, se desarrolló en un período muy corto. Hasta los años ochenta de esa centuria, el vocabulario químico seguía enraizado en la alquimia, en el simbolismo enrevesado de que hicieron gala Paracelso y Maier, salvo para el caso de las sales. Veinte años más tarde, casi todos habían abrazado la nueva doctrina que giraba en torno al oxígeno y reflejaba las definiciones lavoisieranas de elemento y combinación química. De ese proceso trata Marco Beretta en *The Enlightenment of Matter. The Definition of Chemistry from Agricola to Lavoisier.*

Propone Beretta, en línea con Hélène Metzger y Léon Brunschvig, que la química no procede de la alquimia, sino de la escuela del abate Etienne Bonnot de Condillac y, por ende, de una mente que se guía por el análisis cartesiano que precede a la experimentación, que piensa en términos algebraicos y ecuaciones. Tesis provocadora, que no debiera tomarse de forma radical, pues químicos *sensu stricto* eran los trabajos de muchos anteriores al defensor del sensismo.

El número creciente de observaciones químicas y mineralógicas, junto con los múltiples descubrimientos registrados en la segunda mitad del siglo XVII (que motivaron una famosa carta de Cabriada sobre el retraso de la ciencia en España) y principios del XVIII forzaron, por un lado, el planteamiento sobre la constitución última de la materia, y, por otro, la explicación mecanicista de los fenómenos químicos en los tratados de Lemery y Boerhaave.

Para poner orden, había que empezar por aquilatar el lenguaje técnico y clasificar los elementos. No era nuevo el intento. En pleno Renacimiento, Georgius Agricola y Vannocio Biringuccio se habían empeñado ya. Desde las explotaciones auríferas de España por los romanos no se vio en Europa un despliegue de la minería como el registrado a lo largo del siglo XVI, sobre todo en Alemania, Francia, Suecia e Italia. La demanda de hierro, para armas y útiles, estimuló un beneficio más eficaz de las minas, el descubrimiento de minerales desconocidos y la innovación metalúrgica (hornos de fundición). Novedades para cuya denominación se quedan estrechas las fuentes clásicas, que, no obstante, persisten como modelo de referencia. Llamábanse entonces "fósiles" lo que se extraía de las venas del subsuelo. Agricola establece la primera clasificación en 1546; distingue dos tipos de cuerpos minerales, los homogénos y los mixtos, subdividiendo los homogéneos en minerales simples (tierras, fluidos solidificados, piedras y metales) y compuestos.



Laboratorio de Hermann Kolbe en la Universidad de Leipzig, en 1872

El empirismo de Francis Bacon consolidó esa tendencia acrisoladora del lenguaje de la ciencia. Pero la propia limitación de los conocimientos, preñados todavía de una carga cualitativa, impedía avanzar hacia una mayor exactitud. Además, la química, machihembrada en la mineralogía, se entiende como un dominio de los naturalistas, más que de los físicos, hasta el punto de que, cuando los minerales se ordenen de acuerdo con sus notas químicas, se jerarquizarán en clases, géneros y especies. Torbern Bergman epitomiza la época de transición. Por su parte, Jean-Baptiste Romé de l'Isle dio los primeros pasos para una clasificación de los minerales en razón de su estructura cristalina; a él se le debe la ley de la constancia de la inclinación de los ángulos de las caras de cada cristal. La tarea la desarrolló René Haüy, con la discrepancia frontal de Abraham Gottlob Werner, quien rechazaba cualquier enfoque geométrico o físico de clasificación para atenerse a las características externas de los minerales (color, forma, dimensión, transparencia, dureza, tenacidad, peso, etc.).

El gradual distanciamiento del lenguaje de la alquimia, que se iba haciendo patente en las definiciones de los elementos y de los procesos, y avanzado ya el XVII en los glosarios, se reforzaba con nuevos descubrimientos y observaciones de laboratorio. Ensayos y lenguaje que urgían la elaboración de un tramado teórico vertebrador. Creyóse ver la solución en la teoría del flogisto, de Georg Ernst Stahl.

Hasta que llegó Lavoisier, motivo de la segunda mitad de la obra. Sacaremos más provecho de esas ciento cincuenta páginas, si nos sumergimos en otro opúsculo del propio Beretta, *A New Course in Chemistry. Lavoisier's Chemical Paper,* donde se detallan los años de formación de Lavoisier y sus primeros pasos hacia la química, al socaire del descubrimiento de un cuaderno de juventud sobre la naturaleza del arte y los instrumentos de que se vale.

Lavoisier entró en 1754, a los once años, como alumno externo del colegio Mazarin, una suerte de seminario de nobles. Se insistía en la docencia de las ciencias naturales y disponíase de una buena biblioteca y de un pequeño observatorio erigido por Nicolas-Louis de la Caille. Impartía éste las clases de matemáticas y astronomía a las que asistió Lavoisier, quien acudía también a lecciones púlicas de física de Nollet.

En 1763 se le presentan a Lavoisier dos oportunidades singulares. Entra en contacto con el minerólogo Jean-Etienne Guettard, a quien acompaña en sus excursiones de campo, al hilo de las cuales creará su propia colección y escribirá dos memorias de historia natural. Y se agrega también a las salidas herborizadoras de Bernard de Jussieu, inspirador del método natural. Había ya comenzado a familiarizarse con la química en

las clases de Laurent-Charles de La Planche, quien le enseñó la composición de las sales neutras y la preparación de los ácidos de origen mineral. Siguió luego las lecciones dictadas por Rouelle. A uno y a otro les reprocharía que empezaran la enseñanza de la química por el tejado, es decir, por lo más complejo, el reino vegetal, en vez de iniciarla por el mineral, más sencillo. En 1764, debió de escribirse el manuscrito recuperado por Beretta.

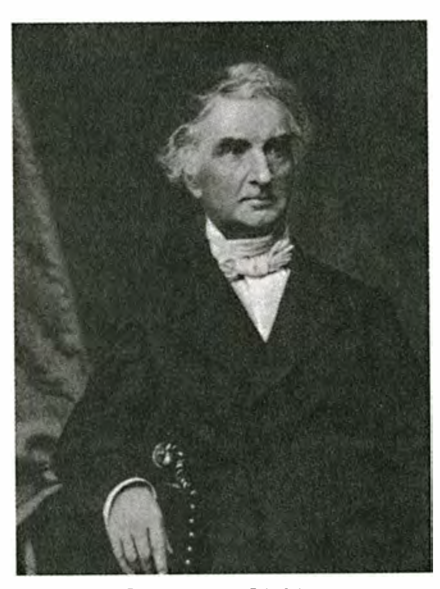
El cuaderno consta de siete partes: definición de química, principios de los cuerpos, fuego, pirómetros, termómetros, propiedades del fuego y electricidad. Por química entiende el joven Lavoisier el "arte que enseña a separar los diferentes principios de que constan los cuerpos, examinarlos, reconocerlos y combinarlos, ya sea para recomponerlos o para formar otros nuevos". Atribuía al fuego la expansión y contracción de los cuerpos.

La carrera de Lavoisier girará en torno a estas cuestiones. Para corroborarlo, retomemos el hilo de *The Enlightenment of Matter* en la página 166, es decir, desde el año 1766, cuando dirige su interés hacia la química neumática. Experimenta, lanza las primeras andanadas contra el flogisto ("Hace ocho días que vi que el azufre, al quemar, lejos de perder peso, lo gana"), busca una base teórica que confiera significado a los datos recogidos ("Hechos, observaciones y experimentos son los sillares del edificio. A nosotros nos toca clasificarlos, adscribirlos al lugar que les corresponde, a la parte del todo al que pertenecen"), idea una nueva nomenclatura, de genial eficacia y simplicidad con la introducción sistemática de los sufijos *-ico, -oso, -ato, -ito, -uro,* que aportaban una indicación cuantitativa del grado de saturación de cada substancia.

Mary Jo Nye prolonga el desarrollo de la epistemología de la química hasta casi hoy en *From Chemical Philosophy to Theoretical Chemistry.* Se propone penetrar en las diferencias de fines y método de la física y la química a lo largo de siglo y medio. El libro gira en torno a tres ejes: autonomía de la química, aparición de la química física e ideas motrices de la química cuántica.

En vez de acotar la constitución de la química con líneas de demarcación internas, se explaya con los aspectos externos. Los dos primeros capítulos son, a mi entender, los más débiles. Nadie duda, por ejemplo, de las relaciones de dependencia maestro-discípulo en la construcción de una disciplina. Pero parece obvio que tendría que privilegiarse la sistematización de observaciones, conceptos, leyes y teorías. Algo de ello pretende remediarse con el capítulo tercero, "Filosofía de la química y filosofía química", donde enhebra tres enfoques metodológicos, a saber, realista, positivo y convencional.

Los sistemas de clasificación de los elementos no terminaron con Lavoisier. Se idearon teorías basadas en tipos, radicales, estructuras y en la ley de los enlaces del carbono. La situación no se asentó hasta la instauración del sistema periódico de Dmitri Mendeleev, que reposa en dos principios: el átomo, o elemento, se inscribe en la intersección de un cuadro formado por sus cuatro vecinos y la masa atómica de aquél es



Justus von Liebig

la media de los que le rodean; en una misma línea horizontal se insieren elementos con propiedades químicas muy distintas pero similares en peso atómico y propiedades físicas; en hilera vertical, familias con distinto peso atómico y parejas propiedades químicas. La tabla de Mendeleev, de potente capacidad predictiva, ponía ante la vista el carácter cuantitativo y exacto de la química.

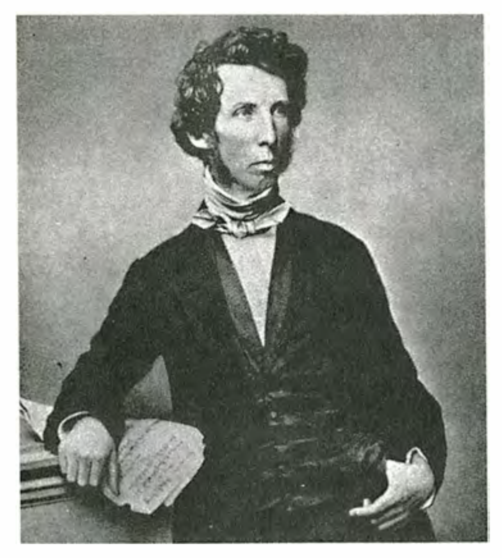
La química del XIX era la orgánica. En ese campo se cosecharon los frutos más espectaculares, se acrisolaron el fin y los métodos de la disciplina, su lenguaje y simbolismo. Pero la industria del último tercio demandaba un cambio, que la hiciera más "física", y empezara a ocuparse de la electrolisis, las condiciones de equilibrio a temperaturas y presiones elevadas, la fotoquímica. Se pasó de una química estática a otra dinámica, donde importaba el proceso de la reacción, más que los reactivos. Si no sus fundadores, encarrilaron su camino Svante Arrhenius, Wilhelm Ostwald y J. H. van't Hoff.

Nye rastrea la configuración de la química física, de lo que muy pronto se asoció a la química teórica, a través de la termodinámica y la cinética. Como es sabido, la primera se ocupa de los sistemas en equilibrio, atiende a sus estados iniciales y finales y determina las relaciones entre energía y propiedades de dichos sistemas. Por su lado, la cinética se centra en las moléculas y procesos de enlace, sustitución, etcétera. Uno de los fenómenos característicos iniciales será el abandono de expresiones tan vaporosas como la de "afinidad" por el de energía libre. La autora hace pivotar el feliz desarrollo de la disciplina en la teoría electrónica de la valencia, en la que convergían físicos y químicos de dos escuelas: la francesa de Raoult-Lespiau y la anglosajona del eje Londres-Manchester.

Los químicos americanos aventajaban a los europeos en el conocimiento de la matemática y la física. Nada tiene de extraño, pues, que entre los promotores de la química cuántica destaquen Linus Pauling, John Slater y Robert Mulliken, que se esforzaron en extender los principios de la mecánica cuántica al dominio molecular. Recurrían a las técnicas de difracción y espectrales para establecer las distancias internucleares y las longitudes de los enlaces. Es decir, para conocer la estructura de las moléculas.

Muchos no tendrían inconveniente en situar la química entre las ciencias físicas. Pensemos en el quicio de la termodinámica, la segunda ley. Clausius creyó siempre que se trataba de una ley mecánica, opinión de la que llegó a participar durante cierto tiempo Boltzmann. Keith J. Laidler ha recorrido la trayectoria de la química física a través del decurso de sus apartados nucleares (termodinámica, teoría cinética, espectroscopía química, electroquímica, cinética química, química de coloides y de superficies y química cuántica) en una obra más didáctica que de investigación histórica en *The World of Physical Chemistry.*

Recuerda el autor que los científicos metidos a historiar caen fácilmente en el pecado de "Whiggery", vale decir, en el recuento de los hechos desde la perspectiva que acaba por imponerse. No acaba él de librarse de ese estigma, por mucho que intente ladearlo con una introducción panorámica, recuadros bio-





Friedrich Wöhler (izquierda) *y Robert Bunsen* (centro), *maestros de Hermann Kolbe* (derecha)

gráficos y apéndices. El valor de la obra yace en el servicio que presta al alumno para entender el desarrollo interno de la química física.

Tomemos, a modo de ejemplo, el capítulo cuarto, la termodinámica. Introducido su nombre por William Thomson (lord Kelvin) en 1849, las ideas nucleares procedían de los trabajos de Sadi Carnot sobre el rendimiento de la máquina de calor. Creía éste que el calor era un "fluido imponderable", en tanto que Joule postularía que se trataba de una forma de energía, lo que llevó a la idea de interconversión de calor y trabajo mecánico.

Esquematiza en fechas los hitos del progreso de la termodinámica, en torno a cuyos protagonistas, y a las fórmulas químicas en que cristaliza su aportación (numeradas correlativamente como si de un manual se tratara), teje la historia de la termodinámica. El cuadro de referencia parte de Black y su contribución a la calorimetría en los años 1760-1766 y termina con la versión mejorada de Simon de la tercera ley de la termodinámica en 1927. Entre una y otra cota, entiende Laidler, va configurándose esta disciplina, a través de la interconversión entre calor y trabajo, la escala absoluta de temperaturas, la segunda ley, disipación de la energía, concepto de entropía, termodinámica química, potencial químico y regla de fases, teoría del equilibrio y energía libre, teoría del equilibrio constante y tercera ley, o, ateniéndonos a las *dramatis personae*, a través de Mayer y Joule, Lord Kelvin, Clausius, Gibbs, Helmholtz, van't Hoff y Nernst.

Con singular hondura y perspicacia está escrita la biografía de Hermann Kolbe (1818-1884) en *The quiet revolution*. En torno a esa figura discutida se hilvana la historia de la química orgánica en la Alemania del siglo XIX y, por extensión, o punto de contraste, en Francia y, algo menos, en Inglaterra y Rusia. Su autor, Alan J. Rocke, químico orgánico de formación, explica historia de la ciencia en una universidad norteamericana. La revolución pacífica a que alude el título significó la implantación de la teoría de la estructura, consolidada a mediados del XIX, merced a los trabajos de August Kekulé, A. S. Couper y A. M. Butlerov. La teoría de la estructura descansa en la noción de valencia y ésta se funda en la distinción entre equivalente químico y peso atómico de un elemento.

Varios factores prepararon esa convulsión tranquila: el declive de la teoría berzeliana de la combinación atómico-molecular fundada en la acción de fuerzas polares, o del dualismo electroquímico; el apogeo subsiguiente de la visión unitaria de las moléculas, o teoría holística de tipos de Dumas, Gaudin, Gerhardt y posteriores adaptaciones; el establecimiento de magnitudes moleculares permanentes; la restauración modificada de los pesos atómicos, y la introducción de la teoría de la "atomicidad" de los elementos, que desembocó en la teoría de valencia y estructura.

La vida de Kolbe se superpone a la línea ascendente de la química germana. Pertenece a la generación inmediata a la de los fundadores, la de Friedrich Wöhler (conocido sobre todo por su síntesis de la urea en 1828), Justus Liebig (en cuyo laboratorio aprenderían teoría, berzeliana, y técnicas muchos químicos europeos) y Robert Bunsen. Kolbe es alumno de Wöhler y de Bunsen.

Wöhler le asigna como tesis de doctorado el estudio de la acción del cloro sobre el disulfuro de carbono. No era entonces el CS_2 una sustancia familiar y debía prepararla, pues, a partir de los elementos. La historia de los pasos intermedios llamó la atención de Berzelius, ya que representaba la formación de productos orgánicos a partir de reactivos inorgánicos. Las enseñanzas recibidas de Bunsen le avalan para ocupar su primer trabajo, analista de hicrocarburos naturales en Londres, y allí tiene ocasión de acometer la electrolisis de ácidos orgánicos. Vuelve a Marburgo, al laboratorio de Bunsen. Con Edward Frankland amplía el número de ácidos sintetizados a partir del nitrilo: fórmico, acético, propiónico, butírico, etcétera. Su entrada en el mundo editorial le obliga a seguir de cerca la evolución de las hipótesis, teorías y nuevos compuestos que van apareciendo.

En 1851 Kolbe se convierte en catedrático de la Universidad de Marburgo. Le da una orientación eminentemente práctica: "El corazón de la instrucción química no está, a diferencia de otras disciplinas, en las clases, sino en el trabajo de laboratorio." Los alumnos comenzaban el análisis cualitativo por los no metales y seguían con los ácidos inorgánicos y sus sales, así hasta realizar 110 análisis de compuestos y mezclas, para concluir con compuestos metálicos complejos y raros. Tras ello, el análisis gravimétrico cuantitativo.

No abandonó, sin embargo, la investigación. A sus años de especial fecundidad (de 1858 a 1865) pertenece la creación de un método para la preparación del ácido salicílico a partir de fenol, ácido carbónico y sodio metálico. (L. A.)

Robert McC. Adams

Lo que va de Sumer a Irak

La Guerra del Golfo y sus secuelas han dejado tras de sí unas imágenes del Irak contradictorias: por un lado, la de un país represor e internamente fragmentado; por otro, la de una sociedad con empuje moral suficiente para levantar gran parte de sus infraestructuras pese al bloqueo económico y la pérdida de los ingresos que le reportaba la exportación de petróleo. En conjunto, el cuadro puede parecer completamente distinto del que ofrece la historia del antiguo Irak, pleno de logros culturales. El territorio que hoy se conoce como Irak fue nada menos que el escenario de la primera civilización ilustrada y urbana a finales del cuarto milenio a.J.C. Y ello no se debió a ningún raro accidente. Aunque con largas interrupciones, la sociedad sumeria y las que le sucedieron seguirían siendo justamente célebres por su elevada cultura durante todo el primer milenio a.J.C.

Sin desmerecer la importancia de esos hitos, sobre los que se han concentrado tantos esfuerzos de los estudiosos, a veces una mayor insistencia en la abstracción puede aclarar las ideas. En este caso, la abstracción sugiere que el contraste entre el pasado y el presente pudiera resultar menos fuerte y más ilustrativo que lo que a primera vista parece.

Un rasgo característico de las sociedades de esta región ha sido el de sustituir por la complejidad organizativa y la jerarquía sus más seguras y generosas dotaciones de recursos naturales. Pero si bien el término jerarquía es suave y neutral, su aplicación no lo fue. Todas las sociedades urbanas de esta zona se han erigido sobre la explotación del campesinado.

La productividad de la Baja Mesopotamia ha sido siempre proverbial, aunque hay también en ello mucha ficción. La subsistencia ha dependido allí de diversas fuentes complementarias, superándose las deficiencias de cada una de ellas mediante complejos dispositivos de redistribución o de mercado. La agricultura de regadío, el componente más importante, ilustra las dificultades. La salinización plantea problemas por doquier, forzando a menudo al abandono de regiones enteras durante años. La gran inseguridad respecto al abastecimiento de agua exacerba más aún los problemas. El sobrerriego lleva a futuros problemas de salinización, pero durante mucho tiempo proporcionó al campesino la única garantía disponible de que al menos este año lo sembrado sobrevivirá al invierno y podrá ser cosechado. En otras palabras, la incertidumbre es endémica y las decisiones a corto plazo a que se ven obligados los labradores intensifican los riesgos.

Imagínese todo esto como un ecosistema sin un factor humano que se autoorganice deliberadamente tratando de mejorar su propio bienestar. La mejor forma de mantenerse el complejo sistema de organismos que sustituyeran a esos habitantes sería en una situación de flexible adaptabilidad y baja densidad. Algunos organismos podrían desenvolverse bien para el almacenamiento de reservas de subsistencias en previsión de las fluctuaciones a corto plazo y para regular el acceso a los recursos. No siendo sino un nuevo tipo de hormiguero, tal sistema representaría con bastante exactitud el funcionamiento básico de la economía que desde el cuarto milenio a. J.C. ha tenido lugar en los pueblos y ciudades de Mesopotamia.

Introdúzcanse ahora gentes reales. Las grandes reservas son preferibles a las pequeñas, pero atraen a los depredadores. Estas gentes construyen murallas, organizan ejércitos, envían partidas de asalto y saqueo. Con la humana propensión a simbolizar, invocan a deidades en busca de justificación, embellecen sus moradas y premian con mil gajes a los nuevos especialistas elegidos para que las atiendan.

Supuestos algún ocio y la vana autoestima, no tardan en aumentar sus discrecionales dominios. Explotan a su propio paisanaje sometiéndolo a servidumbre, mientras cultivan a un creciente número de especialistas en los saberes y en las artes. Estos últimos, a su vez, concretan la construcción entera como mundo divinamente sancionado. El cual llega a dotarse de monumentos culturales que se incorporan la riqueza de su propio simbolismo. Muchos milenios después aquellas afirmaciones de vida trascendente y de poder todavía hallan puestos de honor en bibliotecas y museos.

Recordemos ahora los imperativos del sistema de subsistencia. Altamente productivo en las condiciones óptimas, está sujeto a riesgos incontrolables y a la salinización. Sobre una base del mínimo esfuerzo para el cultivador, opta por la baja intensidad, distribuye los riesgos y el trabajo e internaliza la capacidad para bandearse flexiblemente entre las alternativas de subsistencia. Salen así favorecidos los dispositivos sociales que permiten movilidad (hacia agua más segura y tierra más arable). Algunos grupos de campesinos seminómadas se hallan íntimamente adaptados a estos imperativos. Sus intereses son antitéticos a los de las élites estatales o urbanas que quieren maximizar la explotación de los recursos en beneficio propio. Tales grupos son mejor servidos por estructuras "tribales" de solidaridad basadas en la descendencia compartida y en la recíproca obligación. Ultrajados, pero también temidos por las élites, han sobrellevado siempre la carga mayor de los tributos y del trabajo involuntario. Su inferior posición social y su continua explotación mantienen el carácter represor del sistema.

Naturalmente, los sistemas represivos están siempre en peligro. Toda perturbación, política o ambiental, puede aminorar los recursos de que dependen para su supremacía. La sucesión en el poder es una crisis recurrente. Bajo este aspecto no va aumentando gran cosa la distancia entre el moderno Irak y su pasado.

Nada es determinístico o lineal en la dinámica de este sistema, que se caracteriza por la tensión, la incertidumbre y el conflicto, pero nunca por el equilibrio. Como muchos sistemas sociales y naturales, vaga erráticamente bordeando los confines de dos cuencas de atracción contiguas: el caos y el orden. Los largos intervalos de fragmentación política, de declive urbano y de resurgir tribal dejan pocos registros y monumentos y han recibido muy escasa atención histórica. Son los más breves intervalos de presunto esplendor, conseguido a costa de una centralización artera y duramente impuesta, los que demasiado a menudo se toman para representar al conjunto.